



# **Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

Dirección General de Estudios de Posgrado  
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y  
Geográfica  
Unidad de Posgrado

## **Evaluación del carbón mineral, para disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad**

### **TESIS**

Para optar el Grado Académico de Magíster en Ingeniería  
Metalúrgica con mención en Metalurgia Extractiva

### **AUTOR**

Juan Carlos QUIJANDRÍA LAVARELLO

### **ASESOR**

Dr. Vidal Sixto ARAMBURÚ ROJAS

Lima, Perú

2017



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Quijandría, J. (2017). *Evaluación del carbón mineral, para disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad*. Tesis para optar grado de Magíster en Ingeniería Metalúrgica con mención en Metalurgia Extractiva. Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

---

# HOJA DE METADATOS COMPLEMENTARIOS

CODIGO ORCID DEL AUTOR: NO APLICA

CODIGO ORCID DEL ASESOR O ASESORES (Obligatorio): 0000-0001-7411-3866

DNI DEL AUTOR: 21497115

GRUPO DE INVESTIGACION: NO PERTENECE

INSTITUCION QUE FINANCIA PARCIAL O TOTALMENTE LA INVESTIGACION:  
AUTOFINANCIADO

UBICACIÓN GEOGRAFICA DONDE SE DESARROLLO LA INVESTIGACION. DEBE INCLUIR  
LOCALIDADES Y COORDENADAS GEOGRAFICAS

Distrito de Tomas, Provincia de Oyón, Región Lima. (Empresa SMRL San Alejandro N°17)

Coordenadas:

-12.231272

-75.745521

AÑO O RANGO DE AÑOS QUE LA INVESTIGACION ABARCO:

ENERO 2011

NOVIEMBRE 2014



**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**  
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y  
GEOGRÁFICA**

**UNIDAD DE POSGRADO**

«Año del Buen Servicio al Ciudadano»

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

**SUSTENTACIÓN PÚBLICA**

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Lima, a los quince días del mes de noviembre del 2017, siendo las 12:00 horas, se reúnen los suscritos miembros del JURADO EXAMINADOR DE TESIS, nombrado mediante Dictamen N.º 885/UPG-FIGMMG/2017 del 09 de noviembre del 2017, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

**TÍTULO**

**«EVALUACIÓN DEL CARBÓN MINERAL PARA DISMINUIR EL CONTENIDO DE AZUFRE Y  
MEJORAR SU CALIDAD»**

Que, presenta el Bach. **JUAN CARLOS QUIJANDRIA LAVARELLO**, para optar el **GRADO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA METALÚRGICA CON MENCIÓN EN METALÚRGIA EXTRACTIVA**.

El secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente 05622-FIGMMG-2011 del 16 de agosto del 2011, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento de los Estudios de Maestría».

Luego de la Sustentación de la Tesis, los miembros del Jurado Examinador procedieron a aplicar la escala descrita en el Art. 61 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

*Muy Bueno (17)*

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA METALÚRGICA CON MENCIÓN EN METALÚRGIA EXTRACTIVA** al Bach. **JUAN CARLOS QUIJANDRIA LAVARELLO**.

Siendo las 13:00 horas, se dio por concluido al acto académico

  
MG. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA  
Presidente

  
MG. MELCHOR AQUILES FIGUEROA LOLI  
Secretario

  
MG. PABLO ANTONIO NÚÑEZ JARA  
Miembro

  
MG. ROSA AMELIA CORONADO FALCÓN  
Miembro

  
DR. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS  
Asesor

## **Agradecimiento**

A los Docentes de la Escuela de Posgrado de Ingeniería Metalúrgica, quienes con su experiencia y calidad han contribuido en mi formación profesional y el desarrollo de la presente tesis.

A mi Asesor Dr. Vidal Aramburú Rojas por su valioso apoyo en el desarrollo de la tesis.

### **Dedicatoria**

A mi Madre Nieves y a mis abuelos que en vida fueron Víctor Lavarello y Nieves Siguas, a ellos por su dulzura y amor incondicional, por soportarme y ayudarme a crecer cada día y quienes dieron todo para que sus Hijos y Nietos sean Profesionales con Calidad Humana y estén al servicio de su Comunidad.

# ÍNDICE GENERAL

|  |    |
|--|----|
| ÍNDICE GENERAL                               | 6  |
| LISTA DE TABLAS                              | 9  |
| LISTA DE GRÁFICOS                            | 10 |
| SIMBOLOGÍA                                   | 11 |
| RESÚMEN                                      | 12 |
| ABSTRACT                                     | 13 |
| CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN                     | 14 |
| 1.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA                   | 14 |
| 1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA                 | 15 |
| 1.2.1 Problema General                       | 15 |
| 1.2.2 Problemas Específicos                  | 16 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN                            | 16 |
| 1.3.1 Justificación Teórica                  | 16 |
| 1.3.2 Justificación Práctica                 | 19 |
| 1.4 OBJETIVOS                                | 21 |
| 1.4.1 Objetivo General                       | 21 |
| 1.4.2 Objetivos Específicos                  | 21 |
| 1.5 HIPÓTESIS                                | 22 |
| 1.5.1 Hipótesis General                      | 22 |
| 1.5.2 Hipótesis Específicas                  | 22 |
| 1.6 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES              | 22 |
| 1.6.1 De la Hipótesis General                | 22 |
| 1.6.2 De las Hipótesis Específicas           | 22 |
| 1.6.3 Operacionalización de Variables        | 23 |
| 1.7 MATRIZ DE CONSISTENCIA                   | 24 |
| CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO                   | 25 |
| 2.1 MARCO EPISTEMOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN | 25 |
| 2.2 ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN            | 30 |
| 2.3 BASES TEÓRICAS                           | 33 |
| 2.3.1 Carbón Mineral                         | 33 |
| 2.3.2 Composición del Carbón                 | 33 |



|        |   |    |
|--------|---|----|
| 2.3.3  | Rango de los Carbones Minerales                         | 34 |
| 2.3.4  | Caracterización   | 34 |
| 2.3.5  | Clasificación del Carbón                                | 36 |
| 2.3.6  | Normas Internacionales Para Medir la Calidad del Carbón | 37 |
| 2.3.7  | Propiedades del Carbón                                  | 38 |
| 2.3.8  | Carbón Peruano  | 40 |
| 2.3.9  | Características Generales de los Carbones en el Perú    | 41 |
| 2.3.10 | El Carbón en la Industria                               | 41 |
| 2.3.11 | Aplicaciones y Usos                                     | 42 |
| 2.3.12 | El carbón Como Contaminante                             | 44 |
| 2.3.13 | Azufre  | 44 |
| 2.3.14 | Clasificación del Azufre en Carbón                      | 44 |
| 2.3.15 | Formas de Azufre en el Carbón                           | 44 |
| 2.3.16 | Flotación   | 45 |
| 2.3.17 | Reactivos de Flotación                                  | 45 |
| 2.3.18 | Variables del Proceso de Flotación                      | 46 |
| 2.3.19 | Procesamiento de Carbón Mineral                         | 46 |
|        | CAPÍTULO III: METODOLOGÍA                               | 49 |
| 3.1    | TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN                          | 49 |
| 3.2    | UNIDAD DE ANÁLISIS                                      | 48 |
| 3.3    | POBLACIÓN DE ESTUDIO                                    | 50 |
| 3.4    | TAMAÑO DE MUESTRA                                       | 50 |
| 3.4.1  | Selección de Muestra                                    | 50 |
| 3.5    | TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS                        | 50 |
| 3.5.1  | Procedimiento Metodológico de la Investigación          | 50 |
| 3.5.2  | Análisis e Interpretación de Datos                      | 51 |
| 3.5.3  | Tratamiento de las Muestras                             | 51 |
| 3.5.4  | Caracterización   | 52 |
|        | CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN                     | 57 |
| 4.1    | ANÁLISIS DEL CARBÓN MINERAL                             | 57 |
| 4.1.1  | Análisis Granulométrico                                 | 57 |
| 4.1.2  | Análisis Físico   | 58 |
| 4.1.3  | Análisis Inmediato                                      | 58 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4.1.4 | Análisis Elemental   | 59  |
| 4.1.5 | Poder Calorífico   | 59  |
| 4.1.6 | Análisis Microscópico de la Muestra  | 60  |
| 4.2   | TRATAMIENTO DEL CARBÓN MINERAL POR LAVABILIDAD                                   | 61  |
| 4.2.1 | Análisis Granulométrico  | 61  |
| 4.2.2 | Análisis Físico Tratado con Agua   | 62  |
| 4.2.3 | Análisis Inmediato del Tratamiento por Lavabilidad                               | 62  |
| 4.3   | PRUEBAS DE TRATAMIENTO POR FLOTACIÓN   | 64  |
| 4.4   | DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO  | 73  |
| 4.5   | PRUEBA DE HIPÓTESIS  | 73  |
| 4.5.1 | Hipótesis Estadística 1  | 73  |
| 4.5.2 | Hipótesis Estadística 2  | 75  |
| 4.5.3 | Hipótesis Estadística 3  | 77  |
| 4.6   | PRESENTACIÓN DE RESULTADOS   | 79  |
|       | CONCLUSIONES   | 84  |
|       | RECOMENDACIONES  | 86  |
|       | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS   | 87  |
|       | ANEXOS   | 91  |
|       | Anexo 1: Matriz de consistencia.   | 92  |
|       | Anexo 2: Diagrama metodológico de la investigación realizada del carbón mineral. | 93  |
|       | Anexo 3: Métodos analíticos.   | 94  |
|       | Anexo 4: Tratamiento del carbón mineral con agua.                                | 103 |
|       | Anexo 5: Flotación en Celda tipo Denver.   | 104 |
|       | Anexo 6: Exposición de fotografías.  | 105 |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <i>Tabla 2.1.</i> Rango del carbón mineral  | 35 |
| <i>Tabla 2.2.</i> Clasificación del carbón  | 37 |
| <i>Tabla 2.3.</i> Estándares Internacionales de Calidad del Carbón                                  | 38 |
| <i>Tabla 2.4.</i> Características del carbón mineral peruano  | 41 |
| <i>Tabla 3.1.</i> Características de tamices (ASTM) utilizados                                      | 52 |
| <i>Tabla 3.2.</i> Cantidad de muestras a analizar   | 56 |
| <i>Tabla 4.1.</i> Promedio de Análisis Granulométrico   | 57 |
| <i>Tabla 4.2.</i> Promedio de Análisis físicos de las muestras de carbón                            | 58 |
| <i>Tabla 4.3.</i> Análisis inmediatos del carbón mineral  | 58 |
| <i>Tabla 4.4.</i> Análisis elementales de las muestras de carbón                                    | 59 |
| <i>Tabla 4.5.</i> Poder calorífico de las muestras del carbón mineral                               | 59 |
| <i>Tabla 4.6.</i> Análisis de tamices M-Promedio con H <sub>2</sub> O                               | 61 |
| <i>Tabla 4.7.</i> Colores de las muestras de carbón mineral tratados con H <sub>2</sub> O           | 62 |
| <i>Tabla 4.8.</i> Análisis inmediato de las muestras de carbón mineral tratado con H <sub>2</sub> O | 62 |
| <i>Tabla 4.9.</i> Promedio de muestras a pH 8 y 5 min.  | 64 |
| <i>Tabla 4.10.</i> Promedio de muestras a pH 8 y 7 min.   | 64 |
| <i>Tabla 4.11.</i> Promedio de muestras a pH 8 y 9 min.   | 65 |
| <i>Tabla 4.12.</i> Promedio de muestras a pH 9 y 5 min.   | 65 |
| <i>Tabla 4.13.</i> Promedio de muestras a pH 9 y 7 min.   | 65 |
| <i>Tabla 4.14.</i> Promedio de muestras a pH 9 y 9 min.   | 66 |
| <i>Tabla 4.15.</i> Promedio de muestras a pH 10 y 5 min.  | 66 |
| <i>Tabla 4.16.</i> Promedio de muestras a pH 10 y 7 min.  | 66 |
| <i>Tabla 4.17.</i> Promedio de muestras a pH 10 y 9 min.  | 67 |
| <i>Tabla 4.18.</i> Resumen del Promedio de muestras   | 67 |
| <i>Tabla 4.19.</i> Resumen comparativo de Tratamiento con Agua y flotada a<br>pH 10 y 7 min.        | 67 |
| <i>Tabla 4.20.</i> Comparación de muestra inicial y muestra flotada a pH 10 y 7 min.                | 69 |
| <i>Tabla 4.21.</i> Análisis Químico Elemental de las muestras flotadas                              | 71 |
| <i>Tabla 4.22.</i> Comparativo del Análisis Químico Elemental de las muestras inicial<br>y flotadas | 72 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 1.1. Mapa de Reservas Carboníferas del Perú                     | 18 |
| Gráfico 2.1. Diagrama conceptual de clasificación del carbón mineral    | 47 |
| Gráfico 2.2. Unidad de lavado y clasificación del carbón                | 48 |
| Gráfico 3.1. Unidad de lavado y clasificación del carbón propuesto      | 53 |
| Gráfico 4.1. Distribución de tamaños de la muestra Promedio             | 57 |
| Gráfico 4.2. Partículas libres de grafito (C) y pirita (py) 200X        | 60 |
| Gráfico 4.3. Partículas libres de grafito (C) y pirita (py) 200X        | 60 |
| Gráfico 4.4. Partículas libres de grafito (C) y pirita (py) 200X        | 60 |
| Gráfico 4.5. Partículas libres de grafito (C) y pirita (py) 200X        | 60 |
| Gráfico 4.6. Distribución de tamaños Promedio con H <sub>2</sub> O      | 61 |
| Gráfico 4.7. Promedio Comparativo del Análisis de Humedad               | 62 |
| Gráfico 4.8. Promedio Comparativo del Análisis de Materia Volátil       | 63 |
| Gráfico 4.9. Promedio Comparativo del Análisis de cenizas               | 63 |
| Gráfico 4.10. Promedio Comparativo del Análisis de Carbón Fijo          | 63 |
| Gráfico 4.11. Promedio Comparativo del Análisis de Azufre               | 64 |
| Gráfico 4.12. Estudio comparativo de Materia Volátil (%)                | 68 |
| Gráfico 4.13. Estudio comparativo de cenizas (%)                        | 68 |
| Gráfico 4.14. Estudio comparativo de Carbón Fijo (%)                    | 68 |
| Gráfico 4.15. Estudio comparativo del Poder calorífico (Kcal/Kg)        | 69 |
| Gráfico 4.16. Estudio comparativo de Azufre (%)                         | 69 |
| Gráfico 4.17. Comparativo de Materia Volátil Promedio de Flotación      | 70 |
| Gráfico 4.18. Comparativo de Cenizas promedio de Flotación.             | 70 |
| Gráfico 4.19. Comparativo de Carbón Fijo promedio de Flotación          | 70 |
| Gráfico 4.20. Comparativo del Poder Calorífico promedio de Flotación    | 71 |
| Gráfico 4.21. Comparativo del Contenido de Azufre promedio de flotación | 71 |
| Gráfico 4.22. Comparativo de los promedios de H, N y S Inicial y Final  | 72 |
| Gráfico 4.23. Comparativo de los promedios de C y O Inicial y Final     | 72 |
| Gráfico 4.24. Diagrama de Flujo del Proceso Experimental.               | 73 |
| Gráfico 4.25. Nivel y regiones de la Hipótesis 1                        | 75 |
| Gráfico 4.26. Nivel y regiones de la Hipótesis 2                        | 77 |
| Gráfico 4.27. Nivel y regiones de la Hipótesis 3                        | 79 |

## SIMBOLOGÍA

|                       |                           |
|-----------------------|---------------------------|
| CF                    | Carbón Fijo               |
| CF <sub>inicial</sub> | Carbón Fijo Inicial       |
| CF <sub>final</sub>   | Carbón Fijo Final         |
| PC                    | Poder Calorífico          |
| PC <sub>inicial</sub> | Poder calorífico Inicial  |
| PC <sub>final</sub>   | Poder Calorífico Final    |
| MV                    | Materia Volátil           |
| Cz                    | Cenizas                   |
| TM                    | Toneladas Métricas        |
| S <sub>inicial</sub>  | Azufre Inicial            |
| S <sub>final</sub>    | Azufre Final              |
| T                     | Student                   |
| H <sub>0</sub>        | Hipótesis Nula            |
| H <sub>A</sub>        | Hipótesis Alterna         |
| $\alpha$              | Nivel de Significación    |
| $\emptyset$           | Diámetro                  |
| L/S                   | Relación Líquido – Sólido |
| MIC                   | Metil Isobutil Carbonil   |

## RESÚMEN

En el presente trabajo de tesis, se desarrollan aspectos esenciales referidos al carbón mineral; sus principales características fisicoquímicas, petrográficas, mineralógicas y los procesos de lavabilidad y flotación. La caracterización del carbón estudiado es un carbón bituminoso de alto contenido volátil, con un buen rendimiento energético y baja concentración de cenizas y azufre.

Se ha estudiado la eliminación de materia mineral con especial hincapié en el Azufre, mejoramiento del Carbón Fijo y el Poder Calorífico del carbón mineral de las minas San Alejandro, Oyón.

Del estudio de caracterización del carbón mineral estudiado se ha determinado una granulometría promedio de 93.51% a una malla -200, una dureza de 3, densidad aparente de  $1.30 \text{ gr/cm}^3$ , densidad real de  $1.72 \text{ gr/cm}^3$  y una porosidad de 0.79%. Respecto al análisis inmediato los promedios de las muestras en base seca son de 0.78 % de Humedad, 18.73 % de Materia Volátil, 17.33 % de Cenizas y 60.24 % de Carbón Fijo, Poder Calorífico Superior de 7257.31 Kcal/kg y un Poder Calorífico inferior de 7239.80 Kcal/kg. El análisis microscópico muestra la presencia de 96.91 % de Grafito (grf) y 3.09% de Pirita (py).

Las fracciones de finos de estos carbones estudiados en este trabajo han sido tratadas mediante Lavabilidad y Flotación con espumantes. De los resultados obtenidos por lavabilidad tenemos una disminución del contenido de cenizas promedio de 5.14%, una eliminación promedio de 2.18% de Azufre, un leve incremento de Materia Volátil a 18,65 % y Carbón Fijo a 62,43 %. De los resultados de flotación se tiene una disminución notable de Cenizas de 55.35% y de Azufre de 36.61%; un incremento de carbón Fijo de 16.91% y el Poder Calorífico se incrementó de 7257.31KCal/Kg a 8141.22 KCal/Kg.

**Palabras Claves:** Carbón mineral, Flotación, Azufre, Carbón Fijo, Poder Calorífico.

## ABSTRACT

Its main physicochemical characteristics, petrographic, mineralogical and washability and flotation processes, in this thesis, essential aspects related to coal are developed. The characterization of the studied coal is a high volatile bituminous coal content with good energy efficiency and low concentration of ash and sulfur.

We have studied the removal of mineral matter with emphasis on the Sulphur Coal Fixed improvement and Calorific Value of coal mines of San Alejandro, Oyón.

Characterization study of coal studied was determined an average grain size of 93.51 % at -200 mesh, a hardness of 3 , bulk density of 1.30 g/cm<sup>3</sup> , 1.72 g/cm<sup>3</sup> density of actual and a porosity of 0.79 %. Regarding the analysis immediately sample averages are dry basis 0.78 % Moisture, Volatile Matter 18.73 %, 17.33 % and 60.24 % Ash Fixed Carbon, Superior Calorific 7257.31 Kcal / kg and lower Calorific 7239.80 Kcal / kg. Microscopic analysis showed the presence of 96.91 % Graphite (grf) and 3.09 % of pyrite (py).

Fine fractions of these coals studied in this work have been treated by washability and flotation with foaming. From the results obtained by washability have decreased average ash content of 5.14 %, an average removal of 2.18 % sulfur, a slight increase to 18.65% Volatile Matter and Fixed Carbon 62.43 % to. From the results of flotation have a noticeable decrease of 55.35 % Ash and Sulfur 36.61 %, an increase of 16.91 % Fixed Carbon and Calorific 7257.31KCal/Kg increased from 8141.22 to KCal / Kg.

**Keywords:** Coal, Flotation, Sulfur, Fixed Carbon, Calorific.

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

### **1.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA**

El carbón mineral es una sustancia dura, bituminosa oscura o casi negra, formada por vegetales fosificados, que, aunque no arde con tanta facilidad como el carbón vegetal, produce más calor. El carbón es un recurso no renovable utilizado como combustible, reductor en los procesos industriales de siderurgia, fabricación del cemento, azúcar, licores, papel y cartón, entre otros, así como en la generación de electricidad.

En la combustión del carbón se presentan emisiones de gases fundamentalmente el  $\text{SO}_2$  y material particulado que contamina el medio ambiente y afectan la salud de los humanos, la fauna y el agua. Sin embargo el uso de tecnologías limpias minimiza los efectos negativos de la utilización del carbón.

La preparación del carbón involucra la limpieza de carbón desde la producción en bruto de una mina para generar un producto que se puede extraer y comercializar. La comerciabilidad depende de las propiedades, incluidas el valor de la ceniza, la humedad y la fluidez. El logro de estas propiedades depende de la característica de lavabilidad del carbón. Para mejorar estas propiedades, se utilizan diversas técnicas de separación de gravedad para separar el carbón de la ceniza en una amplia gama de tamaños de partículas. Adicionalmente se requiere una técnica de separación que no dependa de la densidad para tratar el carbón fino. También se utiliza la flotación que aprovecha las diferencias entre la química de la superficie del carbón que es hidrofóbica y de la ceniza que es hidrofílica.

Actualmente a nivel mundial la tendencia de las tecnologías existentes y de las nuevas es encontrar procesos no contaminantes, que puedan producir beneficios económicos, acorde con las reglamentaciones ambientales.



## **1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

El desarrollo del mundo moderno está basado en la disponibilidad de energía calorífica para los procesos industriales y de generación de electricidad. En las últimas décadas, tanto las industrias como el público, han reconocido la creciente necesidad de la preservación del medio ambiente, con respecto de algunos potenciales efectos nocivos ocasionados por economías en crecimiento no regulado.

Un ejemplo de esto es la combustión del carbón mineral en los procesos industriales la cual conlleva emisiones de material particulado, gases como CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y trazas de hidrocarburos que contaminan la atmósfera, afectando los seres vivos, la flora, fauna y los recursos hídricos. El viento favorece la difusión de los contaminantes al desplazar las masas de aire en función de la presión y la temperatura.

Las partículas representan un riesgo para los pulmones, incrementan las reacciones químicas en la atmósfera, producen suciedad y reducen la visibilidad. También reducen la radiación solar, causando cambios en la temperatura ambiental y en las tasas biológicas de crecimiento de las plantas. La salud de los animales puede sufrir cuando se alimentan de plantas cubiertas por particulado tóxico.

El “efecto invernadero” y “lluvia ácida” son, actualmente, el foco de atención internacional en el tema ambiental. El aumento de los gases que producen el efecto invernadero en la atmósfera conduce a un incremento gradual de la temperatura del globo terráqueo.

En la industria siderúrgica, cuando el porcentaje de carbón mineral sobrepasa el 1.5%, tienen problemas de fragilidad de las piezas que producen y se realiza un desgaste prematuro de los refractarios.

Con lo expuesto, se formulan los siguientes problemas:

### **1.2.1 *Problema General***

¿De qué manera la evaluación del carbón mineral, puede disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad?

### **1.2.2 Problemas Específicos**

**PE 1:** ¿Es posible caracterizar el carbón mineral mediante los análisis fisicoquímicos, petrográficos, mineralógico y mecánico?

**PE 2:** ¿Influye la cantidad de carbón fijo y el poder calorífico en la calidad del carbón mineral?

**P.E.3:** ¿El proceso de flotación puede disminuir el contenido de azufre y mejorar la calidad del carbón mineral?

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

### **1.3.1 Justificación Teórica**

En el Perú existen suficientes reservas de antracita en las cuencas del Alto Chicama, Santa y Oyón. Las antracitas son de buena calidad (excepto el alto % de azufre), susceptibles de alcanzar una disminución de cenizas, mediante el escogido de los tamaños mayores de 1" y lavado de los tamaños menores.

El azufre en el carbón destinado para uso metalúrgico juega un papel muy importante ya que se une al metal que se produce, afectando sus propiedades.

Las reservas de carbón bituminoso con medio o bajo contenido de volátiles están ubicadas en la cuenca de Jatunhuasi y a la parte sur de la cuenca de Oyón, respectivamente. SIDERPERU con ayuda con la consultora polaca KOPEX tiene reservas de carbón muy heterogéneas, de las cuales la mitad es carbón sub-bituminoso, que para producir coque necesita ser mezclados con otros tipos de carbones.

El Perú tiene un considerable potencial de carbón cuyo aprovechamiento ofrece variadas oportunidades para los inversionistas. Las mejores posibilidades presentan la explotación e industrialización de la antracita de los Andes Nor-occidentales. La costa norte del Perú, próxima a los yacimientos, se está industrializando y necesita el carbón como materia prima y/o como fuente de energía. El potencial de la antracita en la sierra norte tiene el orden cientos de

millones de toneladas y una gran parte tiene un alto poder calorífico. En los Andes Nor-orientales, al parecer, existen depósitos de hulla que el Perú necesita e importa de Colombia para las industrias del cemento y metalúrgica.

Se debe tener en cuenta que todos los carbones destinados a usos siderúrgicos deben cumplir con requisitos generales y específicos. Entre los requisitos generales se exige que el carbón sea duro, es decir, que tenga un poder calorífico superior a los 6000 cal/gr, luego se exige bajo contenido de las siguientes impurezas: cenizas (máximo 10%), humedad (máximo 8%), azufre (máximo 1,5%), fósforo (máximo 0,04%).

Las explotaciones de la antracita en el Perú son muy pequeñas y primitivas, el transporte es muy caro, la producción es heterogénea y el suministro inseguro. La mayor parte de la antracita extraída se utiliza sin lavado como combustible barato en las ladrilleras y sólo una pequeña cantidad en las industrias.

Cementos Lima y Cemento Andino importa 240,000 TM anuales de carbón sub-bituminoso, con 35% a 38% de material volátil y con los máximos de 10% de humedad y 10% de cenizas. Cementos Pacasmayo importa asimismo 80,000 TM./año de carbón con características similares a las anteriores, Doe Run Perú utiliza 50,000 TM/año de carbón bituminoso coquificable, Aceros Arequipa unas 25,000 TM/año sub-bituminoso y antracita, para su planta de reducción directa en Pisco y SIDERPERU cuando opera el Alto Horno en Chimbote necesita importar entre 120,000 y 150, 000 TM anuales de coque metalúrgico.

El déficit de energía eléctrica en el norte peruano tiene en este momento cientos de megavatios y está creciendo. Para cubrir este déficit se han realizado varios anteproyectos de centrales carbo-eléctricas, basadas en el empleo de antracitas de las cuencas de Chicama y Santa, cuyos yacimientos son accesibles y mejor conocidos.

No existen suficientes conocimientos que motiven a convertir el carbón de recurso natural, en un insumo atractivo como carbón térmico y para la industria. En el futuro la industria puede ser determinada por procesos de bajo costo de operación

y capital. La confiabilidad y bajo precio del carbón mineral son los factores para la utilización en la industria. El carbón mineral puede emplearse en muchas y diversas actividades.



**Figura 1.1 Mapa de Reservas Carboníferas del Perú.**  
Fuente: Minem Perú (2001).

### **1.3.2 *Justificación Práctica***

El carbón es considerado como una de las fuentes de energía más importantes del mundo, con él se produce casi el 40% de la electricidad mundial. En muchos países, esta cifra es todavía mayor, por ejemplo, Polonia obtiene el 94% de su electricidad gracias al carbón, Sudáfrica el 92%, China el 77% y Australia el 76%. El carbón ha sido la fuente de energía con mayor crecimiento en los últimos años; mayor que la del gas, el petróleo, la energía nuclear, la energía hidroeléctrica y las energías renovables.

El carbón es abundante y está distribuido en el mundo de forma más homogénea que el petróleo y el gas. Las reservas mundiales recuperables son las más grandes de todos los combustibles fósiles y la mayoría de los países cuentan al menos con alguna.

El carbón ha tenido un papel importante durante siglos, no sólo en la producción de electricidad, sino también como el principal combustible para la producción de acero, cemento, en procesos industriales de calentamiento y otras actividades industriales. etc. También, en el uso doméstico, se utiliza el carbón para la calefacción y cocción.

En otros países existen plantas demostrativas y comerciales que emplean el carbón mineral en procesos avanzados (aplicaciones emergentes), como las plantas termoeléctricas, la producción de coque para la industria metalúrgica, la producción de un sustituto del gas natural, la generación de energía térmica para la industria metalmeccánica y de servicios y la obtención de materiales intermedios para la fabricación de productos químicos.

El Perú alberga un considerable potencial de carbón cuyo aprovechamiento ofrece interesantes y variadas oportunidades para los inversionistas. Las mejores posibilidades se presentan en la industrialización de la antracita existente, sobre todo, en los Andes noroccidentales. La reserva potencial de la antracita en la sierra norte es del orden de cientos de millones de toneladas. Este tipo de carbón tiene un alto poder

calorífico y puede utilizarse en la industria y en la producción de derivados para la exportación.

Sin embargo, la explotación de antracita en el Perú es pequeña y rudimentaria, su transporte es muy caro debido a la falta de infraestructura vial adecuada, la producción es heterogénea y el suministro inestable. La mayor parte de la antracita extraída se utiliza como fuente de energía barata en las ladrilleras, la calefacción comercial y sola una pequeña fracción en las industrias que por la carencia de un suministro adecuado no se ha desarrollado el mercado para el carbón nacional.

El uso racional de la antracita es la preparación, que en condiciones mínimas consistiría en la homogenización, clasificación por tamaño y lavado. Este trabajo es realizado normalmente por los productores, intermediarios y usuarios. Durante la preparación conviene separar los trozos gruesos, que tienen una mayor cotización. El carbón de mejor calidad se puede exportar siempre y cuando se cuente con un lote de tal magnitud que resulte compatible con la capacidad de una embarcación dedicada.

El lavado es especialmente importante para el beneficio de la fracción fina, que constituye una gran parte de la antracita extraída de la mina. En la actualidad esta fracción no se lava y, en consecuencia, el contenido de material no combustible es alto, lo que reduce su cotización.

La roca sedimentaria de grano muy fino tiene una temperatura de fusión menor que la de las cenizas del carbón y originan su aglomeración. Esto reduce la temperatura de operación de los hornos de antracita, que produce cenizas en polvo de pequeña magnitud.

De los reportes del INGEMMET<sup>1</sup> (1996) en el norte del Perú el déficit de energía eléctrica ha sido del orden de cientos de megavatios y continúa aumentando, para cubrir este déficit se han preparado varios anteproyectos de centrales

---

<sup>1</sup> Instituto Geológico Minero, Metalúrgico del Perú.

carboeléctricas basados en las antracitas de las cuencas de los ríos Chicama y Santa, cuyos yacimientos son más accesibles. La energía producida por estas centrales se alimentaría al sistema nacional interconectado, cuya línea de transmisión se extiende a lo largo de toda la costa del norte del Perú. Algunos de estos proyectos alcanzaron el nivel de factibilidad pero no se concretaron por falta de inversión pública y privada.

El carbón mineral es uno de los combustibles más abundantes del planeta y el Perú no está exento de ello, pero en su composición poseen cantidades importantes de azufre y cenizas que dificultan su utilización. Al igual que en muchos países en la actualidad impiden utilizar el combustóleo como combustible para tecnologías convencionales debido a los contenidos de azufre y de metales.

El problema que tenemos en el Perú, es que la mayor parte de los yacimientos del carbón mineral sobrepasan el 1.5% de azufre y por consecuente no son considerados de buena calidad; motivo por el cual importamos éste insumo.

La industria siderúrgica en la fabricación de aceros, exige como máximo que el carbón tenga 1.5% de azufre, porque si sobrepasa éste límite la pieza que se obtiene tiene problemas de fragilidad y desgaste prematuro de los refractarios. Además el contenido de azufre en el carbón formará con el oxígeno en el transcurso del proceso el SO<sub>2</sub> que es un gas tóxico y contaminante del medio ambiente.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 *Objetivo General***

Evaluar el carbón mineral para disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad.

### **1.4.2 *Objetivos Específicos***

**OE 1:** Caracterizar el carbón mineral, mediante los análisis físicos, químicos, petrográfico mineralógico y mecánico.

**OE 2:** Determinar el porcentaje de carbón fijo y el poder calorífico del carbón mineral.

**O.E.3:** Realizar el proceso de flotación, para disminuir el porcentaje de azufre y mejorar la calidad del carbón mineral.

## **1.5 HIPÓTESIS**

### **1.5.1 *Hipótesis General***

La evaluación del carbón mineral, hará posible disminuir el contenido de azufre y mejorar la calidad.

### **1.5.2 *Hipótesis Específicas***

**H.E. 1:** Los análisis fisicoquímicos, petrográficos, mineralógicos y mecánicos, permiten evaluar las características del carbón mineral.

**H.E. 2:** La determinación óptima del porcentaje de carbón fijo y el poder calorífico, mejorará la calidad del carbón mineral.

**H.E. 3:** El proceso de flotación adecuado, disminuye el contenido de azufre y mejora la calidad del carbón mineral.

## **1.6 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES**

### **1.6.1 *De la Hipótesis General***

#### ***Variable Independiente***

% de azufre presente en el carbón mineral.

#### ***Variable Dependiente***

Calidad del carbón mineral.

### **1.6.2 *De las Hipótesis Específicas***

#### ***Variable Independiente 1***

Análisis físico químicos, petrográficos, mineralógicos y mecánicos.



**Variable Dependiente 1**

Caracterización del carbón mineral.

**Variable Independiente 2**

% de Calor fijo

Poder calorífico

**Variable Dependiente 2**

Calidad del carbón mineral.

**Variable Independiente 3**

% de extracción de azufre.

**Variable Dependiente 3**

Calidad del carbón

**1.6.3 Operacionalización de Variables**

| VARIABLE DEPENDIENTE        | DIMENSIÓN                             | INDICADORES                       |
|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Calidad del Carbón Mineral. | Azufre presente en el carbón mineral. | % de azufre en el carbón mineral. |

| VARIABLE INDEPENDIENTE 1                   | DIMENSIÓN  | INDICADORES                                       |
|--|--|---|
| % de azufre presente en el carbón mineral. | Método de extracción del azufre presente en el carbón mineral. | Cantidad de azufre presente en el carbón mineral. |

| VARIABLE INDEPENDIENTE 2                              | DIMENSIÓN                    | INDICADORES                    |
|---|------------------------------|--------------------------------|
| Carbón fijo y el poder calorífico del carbón mineral. | Cantidad de Materia volátil. | Porcentaje de materia volátil. |
|   | Cantidad de cenizas.         | Porcentaje de cenizas.         |
|   | Cantidad de humedad.         | Porcentaje de humedad.         |

| VARIABLE INDEPENDIENTE 3 | DIMENSIÓN                  | INDICADORES                       |
|--------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Operación de Flotación.  | Dosificación de reactivos. | Cantidad de reactivos.            |
|                          | Densidad de pulpa.         | Cantidad de mineral por litro.    |
|                          | Tamaño de partícula.       | Granulometría del carbón mineral. |
|                          | pH de la pulpa.            | Rango de pH.                      |

## 1.7 MATRÍZ DE CONSISTENCIA

Ver anexo 1.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 MARCO EPISTEMOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN**

Es difícil pensar en nuestro mundo sin tener presente el desarrollo científico y tecnológico en el que nos vemos inmersos, y es que, debemos reconocer que la sociedad y la cultura se encuentran determinadas en buena medida por los complejos procesos de construcción de la ciencia y la tecnología. Fruto por consiguiente del esfuerzo llevado a cabo por cientos de científicos e investigadores; sin embargo, entre todo el material analizado no hemos encontrado ningún trabajo dedicado exclusiva o principalmente a mostrar las dimensiones epistemológicas, ontológicas y metodológicas sobre el carbón mineral. Ciertamente es que podemos localizar algunas reflexiones y comentarios filosóficos aislados, como suele ocurrir, pero no en trabajos completos y profundos sobre dichas cuestiones.

El nivel de desarrollo tecnológico del carbón mineral está profundamente ligado con la economía y el desarrollo energético de muchas naciones del mundo. Sólo hace falta ver las divisiones históricas en Edad de Piedra, Edad de Bronce, Edad de Hierro, etc. para ver la influencia de las revoluciones tecnológicas (por más lentas que éstas hayan sido) en el proceso de civilización.

Es por tanto comprensible el interés de muchos gobiernos en encontrar los mecanismos que aseguren la constante innovación tecnológica. El enfoque más generalizado es realizar investigación en las ciencias básicas con la esperanza de que más tarde se traduzca en ciencia aplicada: en tecnología. Sin embargo, que la relación sea en ese sentido está abierto a debate, y con los altos costos de la investigación científica hay gobiernos que se preguntan si vale la pena. La tarea de la filosofía de la ciencia, además de resolver la cuestión, es definir el camino a seguir a partir de ella.

El carbón es una roca de origen orgánico que se genera por la diagénesis, a cierta presión y temperatura, de material vegetal procedente de pteridofitas, gimnospermas y angiospermas. Su composición incluye además del carbono, hidrógeno, oxígeno, así como pequeñas cantidades de azufre, nitrógeno, dióxido de carbono y metano.

La mayoría de los yacimientos de carbón se generan en paleoambientes pantanosos asociados a lagunas, deltas o estuarios, compuestas esencialmente por restos carbonizados de plantas, las cuales suelen constituir secuencias estratigráficas características, es decir, una secuencia litológica que se repite en el tiempo (ciclotema).

La calidad de cada depósito de carbón se determina por la temperatura y presión, así como por el tiempo de formación conocido como “madurez orgánica”. Durante muchos millones de años, los efectos continuados de la temperatura y la presión han producido cambios en el lignito, aumentando progresivamente su madurez orgánica y transformándolo en la gama de carbones denominados “sub-bituminosos”. Al producirse más cambios químicos y físicos estos carbones se hacen más duros y negros, formando los carbones “bituminosos” o carbones minerales y en condiciones adecuadas, el aumento progresivo de la madurez orgánica puede continuar, formando finalmente la antracita.

Existen diferentes tipos de carbones minerales en función del grado de carbonificación que haya experimentado la material vegetal que originó el carbón. Estos van desde la turba, que es el menos evolucionado y en que la materia vegetal muestra poca alteración, hasta la antracita que es el carbón mineral con una mayor evolución. Esta evolución depende de la edad del carbón, así como de la profundidad y condiciones de presión, temperatura, entorno, etc. en las cuales la materia vegetal evolucionó hasta formar el carbón mineral.

El rango de un carbón mineral se determina en función de criterios tales como su contenido en materia volátil, contenido en carbono fijo, humedad, poder calorífico etc. Así, a mayor rango, mayor es contenido en carbono fijo y mayor el

poder calorífico, mientras que disminuye su humedad natural y la cantidad de materia volátil.

Los materiales de carbono presentan una amplia variedad de propiedades que los hace insustituibles en campos de aplicación muy diferentes. El amplio espectro de materiales implicados y la terminología muy variada (que frecuentemente incluye nombres derivados de la actividad industrial) hacen aconsejable establecer criterios de clasificación de estos materiales que permitan situarlos, y comparar unos con otros, dentro del conjunto global de los sólidos constituidos exclusivamente por carbono.

El carbón tiene una historia larga y variada en cuanto a su uso; algunos historiadores creen que el carbón comenzó a utilizarse comercialmente en China. Hay indicios de una mina situada en el noroeste de China que suministraba carbón para fundiciones de cobre y para la fabricación de monedas hacia el año 1000 AC. Una de las primeras referencias conocidas al carbón fue realizada por el filósofo y científico griego Aristóteles, que hacía referencia a una roca similar al carbón vegetal. Se han encontrado restos de carbón entre las ruinas romanas en Inglaterra, lo que indica que los romanos utilizaban la energía del carbón desde antes de los años 400 DC. En las crónicas de la Edad Media se habla de la extracción de carbón en Europa, e incluso del comercio internacional desde las costas inglesas hacia Bélgica.

Fue durante la revolución industrial en los siglos XVIII y XIX cuando aumentó la demanda de carbón. Las mejoras en el motor de vapor de James Watt, patentado en 1769, fueron las responsables principales del crecimiento del uso del carbón. La historia de la extracción y el uso del carbón está totalmente vinculada a la de la revolución industrial: la producción de acero, el ferrocarril y los barcos a vapor.

Con el desarrollo de la energía eléctrica en el siglo XIX, el futuro del carbón fue acercándose a la generación de electricidad. La primera central eléctrica de combustión de carbón real, desarrollada por Thomas Edison, entró en funcionamiento en Nueva York en 1882, proporcionando electricidad a las luces domésticas.

A pesar que el petróleo sustituyó al carbón como principal fuente de energía primaria en los años 60, con el rápido crecimiento del sector del transporte, el carbón aún sigue siendo fundamental en el conjunto energético del planeta, cubriendo el 23,5% de las necesidades energéticas primarias, el 39% de la electricidad en todo el mundo, más del doble que la siguiente fuente energética, y un esencial 64% en la producción mundial de acero.

El carbón también se utilizó para producir gas para iluminar muchas ciudades (Es también importante el uso doméstico del carbón para calefacción y cocción), lo que se denominó el “gas ciudad”. Este proceso de gasificación vio el crecimiento del uso de la luz de gas en zonas metropolitanas a comienzos del siglo XIX, especialmente en Londres.

En nuestro país, no existe un aprovechamiento como fuente energética, pero si se utiliza parcialmente como materia prima en la fabricación del acero, como fuente de calor en la fabricación de ladrillos y cocinas artesanales.

La diversificación energética y el aprovechamiento del carbón mineral como materia prima están siendo consideradas en la agenda estatal, (existen varios anteproyectos de centrales carboeléctricas basados en las antracitas de las cuencas de los ríos Chicama y Santa, cuyos yacimientos son más accesibles) contemplando no sólo la explotación y realizando investigaciones sobre su aprovechamiento como energía, sobre todo, en el norte del país, al cual se debe incluir, investigar sus propiedades y la necesidad de mejorar la calidad del carbón como materia prima y uso intensivo de manera sustentable.

El Perú alberga un considerable potencial de carbón cuyo aprovechamiento ofrece interesantes y variadas oportunidades para los inversionistas. Las mejores posibilidades se presentan en la industrialización de la antracita existente en los Andes noroccidentales. La reserva potencial de la antracita en la sierra norte es del orden de cientos de millones de toneladas. Este tipo de carbón tiene un alto poder calorífico y puede utilizarse en la industria y en la producción de derivados para la exportación.

La obtención de los carbones limpios se realiza a través de procesos físicos tales como flotación burbujeante, separación ciclónica y procesos químicos tales como lixiviación con ácidos y solventes. En el proceso de flotación burbujeante se utiliza la diferencia de tensión superficial que existe entre la materia orgánica y la materia mineral para separar esas dos sustancias. En este proceso partículas finas de carbón se adhieren a burbujas de aire y se arrastran a la superficie superior de la suspensión de carbón.

El temor del uso del carbón está relacionado a los humos y materias volátiles asociados básicamente al medio ambiente por la contaminación atmosférica. Cuando se realiza la combustión del carbón podemos asumir dos condiciones extremas de operación: la primera que la combustión sea incompleta, produciendo además de calor, la formación de hollín o material particulado en grandes cantidades, y lo que es peor se emitan sustancias tóxicas aromáticas, monóxido de carbono y grandes cantidades de vapores orgánicos causantes del smog, además de una buena cantidad de cenizas con alto contenido de carbón residual o carbono no quemado. Los heteroátomos como el S y el N generan óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno causantes de la llamada lluvia ácida. La segunda cuando la combustión es completa, donde se tiene en cuenta todos los principios científicos y técnicos de la combustión, incluidos la temperatura de reacción, tamaño de partícula, turbulencia, control de partículas y emisiones; donde se producen además de calor, residuos de bióxido de carbono, agua, óxidos de azufre y de nitrógeno y cenizas sin carbón residual.

La industria del carbón está entre estos dos extremos y a medida que la combustión se realice bajo control en los procesos industriales, cada vez estaremos más cerca del segundo caso.

El carbón también es solución al problema ambiental que ocasiona y es fuente de empleo y materia para nuevos usos; por ejemplo el carbón activado, derivado del carbón mineral, contiene meso y microporos que le dan las propiedades de adsorción superficial y los grupos funcionales de los bordes le dan las propiedades de adsorción específica. Estas propiedades se aprovechan en las plantas de tratamiento de aguas residuales para uso doméstico, para evitar los halometanos y compuestos orgánicos y en las plantas industriales para atrapar los vapores

orgánicos. También en casos de derrame de productos peligrosos o en la llamada guerra química o bacteriológica.

Como podemos ver, la humanidad tiene carbón mineral para mucho, su utilización seguirá siendo motor de bienestar y desarrollo humano, y como tal tenemos la obligación de generar soluciones que permitan conservar y abrir mercados para suplir nuestras necesidades y las de nuestros consumidores, incrementar la investigación básica y aplicada, realizar transferencias tecnológicas y establecer técnicas y métodos que permitan obtener un producto rentable, económico y que evite los problemas del medio ambiente.

## **2.2 ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN**

El Ministerio de Energía y Minas, ha establecido como meta reducir el consumo de petróleo a 33% y el crecimiento del consumo de gas y de las energías renovables a 34% y 33% respectivamente. Se están desarrollando diversos proyectos para fomentar el desarrollo y uso de combustibles sustitutos del petróleo y sus derivados.

El carbón es empleado como una fuente de energía primaria para una gran variedad de procesos industriales, principalmente en la industria siderúrgica y en el sector de producción de energía eléctrica y en menor escala en otras industrias. Sin embargo, uno de los principales contaminantes de los procesos de combustión del carbón son los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), proveniente del azufre contenido en dicho combustible.

Entre los trabajos de investigación que se han desarrollado con respecto al tema planteado tenemos el de Juan Manuel Barraza (2), Ingeniero Químico y Profesor de la Universidad del Valle, Colombia, quien desarrolla actualmente un proyecto de investigación con el fin de brindar soluciones a los inconvenientes presentados en la utilización de los carbones con alto contenido de azufre para su utilización como combustible. El principal objetivo de su estudio es separar la materia orgánica del azufre y elementos inorgánicos por medio de dos métodos



físicos, gravedad y centrifugación. Los resultados obtenidos, mostraron que el método por centrifugado presenta un mayor rendimiento tanto en la obtención de carbono libre de materia mineral, así como en la prueba de combustión.

Elard F. León D. (19) en la Revista del Instituto de Investigaciones de la FIGMMG<sup>2</sup>, habla sobre “La importancia del carbón mineral en el desarrollo industrial” y sobre un considerable potencial de carbón cuyo aprovechamiento ofrece variadas oportunidades para los inversionistas. En su conclusión manifiesta las suficientes reservas de antracita en las cuencas del Alto Chicama, Santa y Oyón. Las antracitas son de buena calidad (excepto por el alto % de azufre), susceptibles de alcanzar una disminución de cenizas, mediante el escogido de los tamaños mayores de 1" y lavado de los tamaños menores.

Gómez Vega José Manuel (10), elaboró la tesis doctoral “Eliminación de azufre y elementos traza de carbones de alto rango mediante métodos físicos de depuración”. En su trabajo ha estudiado la eliminación de materia mineral con especial hincapié en el azufre pirítico y los elementos traza de tres antracitas españolas de diferente rango: antracita de tino, antracita de gaiztarro y antracita de velilla; que son actualmente utilizadas en las centrales termoeléctricas de Narcea (Austrias), Compostilla (León) y Guardo (Palencia); respectivamente. Se han caracterizado los carbones de partida, mediante diferentes técnicas y se han correlacionado los resultados obtenidos en los procesos de depuración con las propiedades y estructura de cada carbón. Algunos de los valores más frecuentemente encontrados en las depuraciones de los carbones estudiados mediante aglomeración y flotación son como aproximación muy global, recuperaciones de materia orgánica al 80%, eliminaciones de cenizas al 70%, de azufre pirítico entre 50-60% dependiendo del carbón y eliminaciones de elementos traza como Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, superiores al 50%.

Prieto Fernández Ismael (30), en su trabajo de investigación “Análisis de los parámetros de operación de la combustión del carbón que intervienen en la reducción de las emisiones de dióxido de azufre” hace un estudio de la influencia de varios

---

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

parámetros y condiciones de funcionamiento de dos unidades de carbón pulverizado sobre el grado de retención en las cenizas, del azufre contenido en el carbón, también se estudia la influencia de algunos parámetros sobre la formación de NO<sub>x</sub>. Todo el estudio se realizó utilizando datos normales de funcionamiento al seguirse el estudio de dos unidades paralelas, permite relacionar la retención de azufre con algunos parámetros de diseño como la velocidad de los gases o la distribución de temperaturas. Los resultados obtenidos demuestran que se pueden obtener mejoras importantes en cuanto a los niveles de emisión de dióxido de azufre de las unidades de combustión sin más que aportar criterios de operación. La metodología desarrollada es aplicable a cualquier unidad de combustión para su estudio particular.

Carlos O. Maxera Bedon (22) en el desarrollo de su tesis “Aplicación de la simulación para la optimización del acarreo de mineral” desarrollado en la UNMSM<sup>3</sup>, indica: Otros de los objetivos que podemos mencionar es incentivar a los empresarios e investigadores a encontrar soluciones a problemas futuros ya sea por la carencia de recursos energéticos o por elevados costos, como es el caso del petróleo y el gas, que podrían ser sustituidos en algunas industrias por el uso del carbón mineral. Así calificaríamos proyectos de generación de vapor y electricidad para uso agroindustrial, de producción de hierro esponja usando carbón como reductor de gran interés siderúrgico y valor de exportación, de producción de amoníaco que a su vez es utilizado en la fabricación de fertilizantes y de metanol, materia prima de productos químicos y fibras sintéticas.

Mauro Giraldo P. y Wilfredo Blas G (8), en su estudio “Minería actual del carbón en el norte del Perú”. En su parte introductoria refiere: La fuente de energía proveniente del carbón producido en el norte de nuestro país está siendo aprovechada por las siguientes industrias: fábricas de cemento, siderúrgicas, ladrilleras, briquetas para calefacción y uso doméstico.

Aramburú R. Vidal, Núñez J. Pablo y otros (1); en el trabajo de Investigación “Disminución del contenido de azufre en carbón mineral, mediante procesos metalúrgicos para uso industrial”, en uno de sus objetivos señala que “Para

---

<sup>3</sup> Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

la mediana, pequeña minería y la industria en general que se dedican a la utilización del carbón, es importante mejorar la calidad y disminuir el porcentaje de azufre del carbón mineral que tenemos en el país, mediante procesos metalúrgicos fundamentalmente con el proceso de flotación, para encontrar una tecnología limpia y apropiada”.

Realizado el análisis microscópico de la muestra de carbón, indican como resultado lo siguiente:

- La caracterización mineralógica de la muestra de carbón ha arrojado la presencia de los siguientes minerales: Grafito (grf) y pirita (py).
- La distribución porcentual indica: grafito =96,91% y pirita = 3,09%.
- Las partículas mayormente están libres, motivo por el cual de acuerdo al análisis modal, el grado de liberación tanto del grafito y pirita es de 100%; es decir todas las partículas contadas están libres.

## **2.3 BASES TEÓRICAS**

### **2.3.1 *Carbón Mineral***

Generalmente se define al carbón como una roca de origen orgánico que se genera por la diagénesis, a cierta presión y temperatura, de materia vegetal procedente de pteridofitas, gimnospermas y angiospermas.

El carbón es un combustible fósil. Es una roca combustible, sedimentaria y de origen orgánico, compuesta principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno. Se formó a partir de la vegetación, que se ha ido consolidando entre otros estratos de roca y se ha alterado por los efectos combinados de la presión y el calor a lo largo de millones de años para acabar formando las vetas de carbón (15).

### **2.3.2 *Composición del Carbón***

Los elementos principales de que están compuestos los carbones son: carbono, hidrógeno y oxígeno, junto con pequeñas cantidades de azufre, nitrógeno y otros elementos característicos de la materia inorgánica.

Una serie de alteraciones químicas, gracias a la acción de las bacterias, consiste en un enriquecimiento progresivo en átomos de carbón, transformando las moléculas orgánicas (fundamentalmente celulosa) en carbón y subproductos como el  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ .

Este proceso bioquímico es complementado en una alteración geológica, la maduración, consiste en una compactación, pérdida de agua y expulsión de las sustancias volátiles que se habían formado previamente. La maduración sería favorecida por factores: la presión y temperatura.

El carbón, hidrógeno, nitrógeno y una parte del azufre se combinan en moléculas muy complejas con alto peso molecular, que fueron producidas de la sustancia vegetal original por las reacciones de carbonificación (19).







### **2.3.3 *Rango de los Carbones Minerales***

Existen diferentes tipos de carbones minerales en función del grado de carbonificación que haya experimentado la materia vegetal que originó el carbón. Estos van desde la turba, que es el menos evolucionado y en que la materia vegetal muestra poca alteración, hasta la antracita, que es el carbón mineral con una mayor evolución. Esta evolución depende de la edad del carbón, así como de la profundidad y condiciones de presión, temperatura, entorno, etc. en las cuales la materia vegetal evolucionó hasta formar el carbón mineral. El rango de un carbón mineral se determina en función de criterios tales como su contenido en materia volátil, contenido en carbono fijo, humedad, poder calorífico etc. Así, a mayor rango, mayor es el contenido en carbono fijo y mayor el poder calorífico, mientras que disminuyen su humedad natural y la cantidad de materia volátil (23). En cuanto a los parámetros de rango estos pueden variar de una clasificación a otra. En la tabla 2.1 se muestran los tipos y rangos promedio del carbón mineral.

### **2.3.4 *Caracterización***

Existen múltiples ensayos que sirven de sustento para la caracterización de los carbones, uno de ellos es la composición química elemental que está relacionado directamente con la utilización a la que se le destina el carbón. Entre las principales propiedades del carbón para su evaluación y aceptación tenemos (6):

**Tabla 2.1. Rango del carbón mineral.**

| RANGO   |  |   | C fijo (%) | Humedad (%) | Materia Volátil (%) | Poder calorífico (MJ/kg) |
|---|--|---|------------|-------------|---------------------|--------------------------|
| Antracita   |   |  <p>mayor contenido en C fijo, mayor poder calorífico<br/>AUMENTO DEL RANGO<br/>menor humedad, menor contenido en materia volátil</p> | 86 - 98    | < 3         | < 5                 | 23 -33                   |
| Bituminoso (Hulla)<br>(bajo, medio y alto en volátiles) |   |   | 45 - 86    | 5 - 10      | 10 - 30             | 24-35                    |
| Sub-bituminoso  |   |   | 35 - 45    | 15 - 30     | 30 - 40             | 20-21                    |
| Lignito   |   |   | 25 - 42    | 40 - 60     | 40 - 50             | 10-20                    |
| Turba   |  |   | < 25       |             |                     |                          |

*Fuente.* MENENDEZ DIAZ, José A. “El carbón en la vida cotidiana”. Instituto Nacional del Carbón. España, (2012).

#### 2.3.4.1 *Análisis Inmediato*

Comprende la medida del contenido de Humedad, Volátiles, Cenizas y Carbón Fijo; es la forma más simple y generalizada de caracterizar un carbón debido a que se puede realizar con un equipo básico de laboratorio, aunque hoy en día existen equipos totalmente automáticos.

#### 2.3.4.2 *Análisis elemental*

Se denomina así a la composición elemental de la fracción orgánica del carbón y se determina en base a métodos de oxidación, descomposición y/o reducción; los análisis se realizan mediante equipos automáticos basados fundamentalmente en la técnica del infrarrojo.

Los elementos analizados son carbono, Hidrógeno, Nitrógeno, Azufre y oxígeno (Obtenido por diferencia).

Los contenidos de carbono e hidrógeno permiten estimar el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O que se producirán en la combustión.

#### **2.3.4.3 Poder Calorífico**

Es uno de los principales parámetros característicos de todo carbón. Se define como la cantidad de calor que se libera cuando se quema la unidad de masa de un carbón en condiciones normalizadas.

El ensayo se realiza mediante una bomba calorimétrica, a través de la determinación de las diferencias de temperatura antes y después de que se produzca la combustión de la muestra. De esta manera se calcula el poder calorífico bruto a volumen constante (Poder Calorífico Superior), esto es, la energía total del carbón incluyendo el calor latente de condensación del vapor formado en el proceso.

#### **2.3.5 Clasificación del Carbón**

De acuerdo a la Norma ASTM<sup>4</sup> D 388 - 82. Clasifica los carbones minerales por rango, de acuerdo a la tabla 2.2 donde los contenidos de carbono fijo (CF) y materias volátiles (MV) se determinan sobre muestras secas, libres de otras materias minerales. El poder calorífico se determina sobre muestras con humedad natural inherente.

Los carbones de más de 69% CF se clasifican según el contenido de carbono fijo, sin tener en cuenta su valor calorífico.

En la tabla hay que tener en cuenta que:

- Los contenidos de carbono fijo (CF) y materias volátiles (MV) se determinan sobre muestras secas, libres de otras materias minerales.
- El poder calorífico se determina sobre muestras con humedad natural inherente.

---

<sup>4</sup> American Society for Testing and Materials

- Los carbones de más de 69% CF se clasifican según el contenido de carbono fijo, sin tener en cuenta su valor calorífico.

**Tabla 2.2. Clasificación del carbón.**

| TIPO           | CLASE              | C.F. (%) | M.V. (%) | PODER CALORIFICO (BTU/lb) | CARÁCTER AGLOMERANTE     |
|----------------|--------------------|----------|----------|---------------------------|--------------------------|
| ANTRACITA      | 1. Meta antracita  | 98       | ≤ 2      |                           | Carbones no aglomerantes |
|                | 2. Antracita       | 92 - 98  | 2 - 8    |                           |                          |
|                | 3. Semi antracita  | 86 - 92  | 8 - 14   |                           |                          |
| BITUMINOSO     | 1. Bajo volátil    | 78 - 86  | 14 - 22  |                           | Carbones aglomerantes    |
|                | 2. Medio volátil   | 69 - 78  | 22 - 31  |                           |                          |
|                | 3. Alto volátil A. | < 69     | > 31     | 13 000 - 14 000           |                          |
|                | 4. Alto volátil B  |          |          | 11500 - 1300              |                          |
|                | 5. Alto volátil C  |          |          | 10500 - 11500             |                          |
| SUB BITUMINOSO | 2. Clase A         |          |          | 10500 - 11500             | Carbones no aglomerantes |
|                | 3. Clase B         |          |          | 9500- 10500               |                          |
|                | 4. Clase C         |          |          | 8300 - 9500               |                          |
| LIGNITICO      | 1. Lignito A       |          |          | 6300 - 8300               |                          |
|                | 2. Lignito B       |          |          | < 6300                    |                          |

*Fuente. Norma ASTM D 388 - 82.*

### 2.3.6 Normas Internacionales Para Medir la Calidad del Carbón

En la tabla 2.3 se detallan algunas normas internacionales. Cabe destacar que, en términos generales estas normas se refieren a la pureza química, a las propiedades físicas y el almacenamiento (11).

**Tabla 2.3. Estándares Internacionales de Calidad del Carbón.**

|                                  |                | Bélgica    |    | Francia   |    | Alemania |
|----------------------------------|----------------|------------|----|-----------|----|----------|
|                                  | Normas         | NBNM11-001 |    | NF N°846E |    | DIN51749 |
|                                  |                | Categoría  |    | Categoría |    |          |
|                                  | Unidades       | A          | B  | A         | B  |          |
| <b>Pureza Química</b>            |                |            |    |           |    |          |
| Carbono fijo                     | %min. Del peso | 82         | 75 | 82        | 75 | 78       |
| Materias volátiles               | %max. Del peso | 12         | -  | -         | -  | 16       |
| Contenido de ceniza              | %max. Del peso | -          | -  | -         | -  | 6        |
| Humedad                          | %max. Del peso | 7          | 7  | 7         | 7  | 8        |
| <b>Propiedades físicas</b>       |                |            |    |           |    |          |
| <b>Pedazos</b>                   |                |            |    |           |    |          |
| >20mm                            |                | 75         | 75 | 85        | 85 | 90       |
| >10mm<20mm                       |                | 19         | 19 | -         | -  | -        |
| <10mm                            |                | 6          | -  | -         | -  | -        |
| <b>Procedimiento</b>             |                |            |    |           |    |          |
| T° de Carbonización °C<br>Mínima |                | -          | -  | -         | -  | 380      |

Fuente. GUARDADO G. Melvin, RODRIGUEZ R. José y MONGE H. Luis (11).

### 2.3.7 Propiedades del Carbón

Las propiedades que se van a estudiar del carbón son unas más importantes que otras desde el punto de vista de la maquinaria y tecnología que se va a usar con el carbón (32).

#### 2.3.7.1 Propiedades Mecánicas

**Dureza:** Se mide por el tamaño y profundidad de la raya producida por un cuerpo penetrante de forma diversa (cono, esfera, pirámide) y con dureza extrema.

De los componentes del carbón, el que presenta más dureza es el durenó, y el más blando es el vitrenó.

**Abrasividad:** Es la capacidad del carbón para desgastar elementos metálicos en contacto con él.



**Resistencia Mecánica:** Esta propiedad está directamente relacionada con la composición petrográfica del carbón. Tiene gran influencia en los sistemas de explotación del carbón. Esto es porque muchas veces la veta carbonífera se usa como paredes, techos y suelos de las propias galerías de la explotación.

**Cohesión:** La cohesión es la acción y efecto que tiende a unir los componentes de la materia carbonosa. Se trata de una propiedad positiva o de resistencia.

**Friabilidad:** Es la capacidad que presentan los carbones de descomponerse fácilmente en granulometrías inferiores por efecto de un impacto o un rozamiento. Esta propiedad habrá que tenerla muy en cuenta en algunos procesos, puesto que nos da la tendencia del carbón a romperse durante su manipulación.

#### **2.3.7.2 Propiedades Térmicas**

**Conductibilidad Térmica:** Es la capacidad que presenta el carbón para conducir el calor. Tiene importancia sobre todo en los hornos de coquización.

**Calor específico:** Es la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura de 1g de carbón 1°C. También es importante esta propiedad en el proceso de coquización.

**Dilatación:** Es el aumento de volumen por efecto del incremento de temperatura. Estudios sobre la dilatación de los carbones concluyen que la antracita presenta importantes variaciones en el volumen con cambios de temperatura, pero dependiendo también de la orientación (anisotropía).

#### **2.3.7.3 Propiedades Eléctricas**

**Conductividad Eléctrica:** Capacidad para conducir la corriente eléctrica. Se define en términos de resistencia específica, que es la resistencia de un bloque de carbón de 1 cm de longitud y 1 cm<sup>2</sup> de sección. La unidad es el ohm ( $\Omega$ ).

**Constante Dieléctrica:** Esta propiedad es más tenida en cuenta que la conductividad eléctrica. Se trata de una medida de la polarizabilidad electrostática del carbón dieléctrico.

#### **2.3.7.4 Propiedades Físicas**

**Densidad:** La densidad del carbón es una magnitud difícil de medir. Se definen varios tipos de densidad (Densidad a granel o en masa, Densidad de carga o estiba, Peso específico aparente, Peso específico verdadero, Peso específico unitario).

**Contenido en agua:** El carbón contiene agua tanto por su proceso de formación en origen como por las transformaciones sufridas. El agua se puede presentar de varias maneras (Agua de Hidratación, Agua Ocluida, Agua de Inhibición).

Un problema añadido al contenido del agua en carbón es en el almacenamiento. El agua provoca la meteorización del carbón, debido a los cambios de volumen de aquélla al pasar de sólido a líquido.

#### **2.3.8 Carbón Peruano**

Por los estudios geológicos existentes, que generalmente son de limitado alcance, sabemos que, debido a las intensas perturbaciones geológicas que tuvieron ocurrencia principalmente durante el terciario, las secuencias estratigráficas de la gran mayoría de estos yacimientos sufrieron considerables plegamientos, fallas, sobre escurrimientos, etc., dando lugar a que los yacimientos descubiertos se hallen en áreas reducidas y discontinuas (19).

El Perú alberga un considerable potencial de carbón cuyo aprovechamiento ofrece interesantes y variadas oportunidades para los inversionistas. Las mejores posibilidades se presentan en la industrialización de la antracita existente en los Andes Noroccidentales. La reserva potencial de la antracita en la sierra norte es de cientos de millones de toneladas. Este tipo de carbón tiene un alto poder calorífico y puede utilizarse en la industria y en la producción de derivados para la exportación.

### 2.3.9 Características Generales de los Carbones en el Perú

En la tabla 2.4 se describen las características de los carbones en el Perú.

**Tabla 2.4. Características del carbón mineral peruano.**

| CARACTERÍSTICAS DEL CARBÓN MINERAL | CUENCA DEL ALTO CHICAMA | CUENCA DEL SANTA         | CUENCA DE OYON GAZUNA |                            | CUENCA DE GOYLLARISQUISGA Y JATUNHUASI |           | PIÑAPATA Y TUCO | YACIMIENTO DE TUMBES |
|------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|--|-----------|-----------------|----------------------|
|                                    |                         |                          | OYON                  | GAZUNA                     | GOYLLAR                                | JATUM     |                 |                      |
| Tipo de Carbón (ASTM)              | Antracita               | Antracita + metantracita | Semi bituminoso       | Antracita + semi antracita | Bituminoso y sub-bituminoso            |           | Antracita       | Lignito              |
| Humedad (%)                        | 4.0-12.0                | 4.0-6.0                  | 6                     | 6                          |  | 6.0-10.0  | 4.0-4.5         | 9.0-18.0             |
| Materia Volátil (%)                | 2.6-12                  | 5.0-6.0                  | 16-22                 | 6.0-14                     | 28.4                                   | 52.0-88.0 | 4.0-8.0         | 27.0-82.0            |
| Cenizas (%)                        | 8.0-10.0                | 7.0-12.0                 | 6.0-12.0              | 5.0-10.0                   | 54                                     | 6.0-20.0  | 6.0-35.0        | 20.0-56.0            |
| Azufre (%)                         | 1.0-2.5                 | 0.5-1.0                  |                       |                            | 12.1                                   | 0.60-2.0  | 0.6-1.2         | 4.0-5.0              |
| Carbón Fijo (%)                    | 80-85                   | 80 – 85                  | 65-75                 | 70-80                      | 22.6                                   | 40-60     | 62.0-85.0       | 20.0-30.0            |
| Poder Calorífico                   | 7000-7500               | 6000-7500                | 7000-7600             | 6500-7500                  |  | 5000-7000 | 6400-7600       | 2700-4500            |
| Densidad (TM/m <sup>3</sup> )      | 1.8                     |                          |                       |                            |  |           |                 |                      |
| Reser<br>vas<br>(TM)               | Probadas + Probables    | 690000000                | 488000000             |                            | 260000000                              | 1251000   | 815000          |                      |
|                                    | Posibles                | 25000000                 | 1.58x10 <sup>8</sup>  |                            | 420000000                              | 5000000   | 600000000       | 50000000             |
| CARACTERÍSTICAS DEL CARBÓN MINERAL | CUENCA DEL ALTO CHICAMA | CUENCA DEL SANTA         | CUENCA DE OYON GAZUNA |                            | CUENCA DE GOYLLARISQUISGA Y JATUNHUASI |           | PIÑAPATA Y TUCO | YACIMIENTO DE TUMBES |
|                                    |                         |                          | OYON                  | GAZUNA                     | GOYLLAR                                | JATUM     |                 |                      |
| Tipo de Carbón (ASTM)              | Antracita               | Antracita + metantracita | Semi bituminoso       | Antracita + semi antracita | Bituminoso y sub-bituminoso            |           | Antracita       | Lignito              |
| Humedad (%)                        | 4.0-12.0                | 4.0-6.0                  | 6                     | 6                          |  | 6.0-10.0  | 4.0-4.5         | 9.0-18.0             |
| Materia Volátil (%)                | 2.6-12                  | 5.0-6.0                  | 16-22                 | 6.0-14                     | 28.4                                   | 52.0-88.0 | 4.0-8.0         | 27.0-82.0            |
| Cenizas (%)                        | 8.0-10.0                | 7.0-12.0                 | 6.0-12.0              | 5.0-10.0                   | 54                                     | 6.0-20.0  | 6.0-35.0        | 20.0-56.0            |
| Azufre (%)                         | 1.0-2.5                 | 0.5-1.0                  |                       |                            | 12.1                                   | 0.60-2.0  | 0.6-1.2         | 4.0-5.0              |
| Carbón Fijo (%)                    | 80-85                   | 80 – 85                  | 65-75                 | 70-80                      | 22.6                                   | 40-60     | 62.0-85.0       | 20.0-30.0            |
| Poder Calorífico                   | 7000-7500               | 6000-7500                | 7000-7600             | 6500-7500                  |  | 5000-7000 | 6400-7600       | 2700-4500            |
| Densidad (TM/m <sup>3</sup> )      | 1.8                     |                          |                       |                            |  |           |                 |                      |
| Reser<br>vas<br>(TM)               | Probadas + Probables    | 690000000                | 488000000             |                            | 260000000                              | 1251000   | 815000          |                      |
|                                    | Posibles                | 25000000                 | 1.58x10 <sup>8</sup>  |                            | 420000000                              | 5000000   | 600000000       | 50000000             |

**Fuente.** Revista del Instituto de Investigaciones de la FIGMMG- UNMSM. Vol. 10 N° 20, 76-81, 2007(8).

### 2.3.10 El Carbón en la Industria

El petróleo, el carbón y el gas natural son los grandes protagonistas de la revolución industrial en nuestros días. De ellos depende la mayor parte de la energía de la industria y transporte. Actualmente el 79,6% de la energía comercial proviene del petróleo, carbón y gas natural, y producen problemas de contaminación,

acentuándose el efecto invernadero, ya que emiten CO<sub>2</sub> y otros gases, pero no se podría dejar de utilizarlos si no disponemos de un sustituto adecuado, ya que el desarrollo se paralizaría. La energía nuclear también tiene importante repercusión ambiental, ya que produce residuos peligrosos que duran miles de años en su destrucción (19).

Entre los diferentes tipos de energía utilizados en la actualidad, se tiene:

|                               |         |
|-------------------------------|---------|
| Petróleo                      | : 35,8% |
| Carbón                        | : 23,7% |
| Gas Natural                   | : 20,1% |
| Biomasa                       | : 11,1% |
| Nuclear                       | : 6,6%  |
| Hidroeléctrica, Solar, eólica | : 2,7%  |

#### **2.3.11 Aplicaciones y Usos**

El carbón suministra el 25% de la energía primaria consumida en el mundo, sólo por detrás del petróleo. Además es de las primeras fuentes de energía eléctrica, con 40% de la producción mundial. Las aplicaciones principales del carbón son (23):

##### **2.3.11.1 Generación de Energía Eléctrica**

Las centrales térmicas de carbón pulverizado constituyen la principal fuente mundial de energía eléctrica. En los últimos años se han desarrollado otros tipos de centrales que tratan de aumentar el rendimiento y reducir las emisiones contaminantes, entre ellas las centrales de lecho fluido a presión. Otra tecnología en auge es la de los ciclos combinados que utilizan como combustible gas de síntesis obtenido mediante la gasificación del carbón.

##### **2.3.11.2 Coque**

Es el producto de la pirolisis del carbón en ausencia de aire. Es utilizado como combustible y reductor en distintas industrias, principalmente en los altos hornos (coque siderúrgico). Dos tercios del acero mundial se producen utilizando coque de carbón, consumiendo en ello 12% de la producción mundial de carbón.

### **2.3.11.3 Siderurgia**

Mezclando minerales de hierro con carbón se obtiene una aleación en donde el hierro se enriquece en carbono, obteniendo mayor resistencia y elasticidad.

Dependiendo de la cantidad de carbono, se obtiene:

- ☐ Hierro dulce: menos del 0,2 % de carbono.
- ☐ Acero: entre 0,2% y 1,2% de carbono.
- ☐ Fundición: más del 1,2% de carbono.

### **2.3.11.4 Industrias Varias**

Se utiliza en las fábricas que necesitan mucha energía en sus procesos, como las fábricas de cemento y de ladrillos.

### **2.3.11.5 Uso Domestico**

Históricamente el primer uso del carbón fue como combustible doméstico. Aún hoy sigue siendo usado para calefacción, principalmente en los países en vías de desarrollo, mientras que en los países desarrollados ha sido desplazados por otras fuentes más limpias de calor (gas natural, propano, butano, energía eléctrica) para rebajar el índice de contaminación.

### **2.3.11.6 Carboquímica**

Es practicada principalmente en África del Sur y China. Mediante el proceso de gasificación se obtiene del carbón un gas llamado gas de síntesis, compuesto principalmente de hidrógeno y monóxido de carbono. El gas de síntesis es una materia prima básica que puede transformarse en numerosos productos químicos de interés como, por ejemplo: Amoníaco, Metanol, Gasolina y gasóleo.

### **2.3.11.7 Petróleo Sintético**

Mediante el proceso de licuefacción directa, el carbón puede ser transformado en un crudo similar al petróleo. La licuefacción directa fue practicada ampliamente en Alemania durante la Segunda Guerra Mundial pero en la actualidad no existe ninguna planta de escala industrial en el mundo.

### **2.3.12 *El carbón Como Contaminante***

La lluvia ácida constituye un serio problema ambiental y es ocasionada principalmente por la contaminación atmosférica proveniente de la combustión de combustible fósiles que contienen azufre. La lluvia ácida se forma generalmente en las nubes altas donde el  $\text{SO}_2$  y los  $\text{NO}_x$  reaccionan con el agua y el oxígeno formando una solución diluida de ácido sulfúrico y ácido nítrico, contribuyendo la radiación solar al aumento de dicha reacción.

### **2.3.13 *Azufre***

Es un elemento químico de número atómico 16 y símbolo S (del latín sulphur). Es un no metal abundante con un olor característico. El azufre se encuentra en forma nativa en regiones volcánicas y en sus formas reducidas formando sulfuros y sulfosales o bien en sus formas oxidadas como sulfatos.

### **2.3.14 *Clasificación del Azufre en Carbón***

El azufre en el carbón se clasifica como inorgánico u orgánico. En el primer caso, el azufre puede estar en forma de pirita, sulfato o como azufre elemental, este último muy raro y de poca importancia desde el punto de vista ambiental. El más importante, por la cantidad de carbón, es el azufre en pirita, la cual presenta dos formas: la singenética, partículas de pirita muy pequeñas y altamente diseminadas en la matriz de carbón, y la pirita epigenética, cristales de pirita incrustados intergranularmente en las partículas de carbón. De ambas la segunda es la más fácil de eliminar por los procesos convencionales actualmente usados: procesos de separación física que emplean medio denso, ciclones, separadores neumáticos, espirales, separación magnética y columnas de flotación (4).

### **2.3.15 *Formas de Azufre en el Carbón***

***Azufre pirítico:*** Los sulfuros metálicos forman inclusiones físicamente distintas de la matriz orgánica del carbón, pudiéndose separar de ella por medios físicos.

***Azufre orgánico:*** El azufre orgánico se encuentra unido covalentemente formando parte de la configuración molecular del carbón, siendo su distribución en la matriz carbonosa más homogénea que la pirita.

**Azufre sulfato:** Está presente en la materia mineral del carbón en forma de sulfatos de hierro, calcio y bario. En el carbón no meteorizado, la cantidad presente de este tipo de azufre suele ser menor del 0.1% (35).

### **2.3.16 Flotación**

La flotación es un proceso físico-químico de separación de minerales o compuestos finamente molidos, basados en las propiedades superficiales de los minerales (mojabilidad), que hace que un mineral o varios se queden en una fase o pasen a otra. Las propiedades superficiales pueden ser modificadas a voluntad con ayuda de reactivos.

El proceso de flotación se basa en las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas de los minerales. Se trata fundamentalmente de un fenómeno de comportamiento de sólidos frente al agua.

Los metales nativos, sulfuros o especies como el grafito, carbón bituminoso, talco y otros son poco mojables por el agua y se llaman minerales hidrofóbicos. Por otra parte, los sulfatos, carbonatos, fosfatos, etc. son hidrofílicos o sea mojables por el agua.

### **2.3.17 Reactivos de Flotación**

Los reactivos de flotación se dividen en: colectores, espumantes y modificadores (32).

#### **2.3.17.1 Colector**

Es un reactivo químico orgánico del tipo surfactante, que tiene la propiedad de adsorberse selectivamente en la superficie de un mineral y lo transforma en hidrofóbico.

#### **2.3.17.2 Espumante**

Es un reactivo químico orgánico del tipo surfactante, que se adiciona a la pulpa con el objetivo de estabilizar la espuma, en la cual se encuentra el mineral de interés.

### **2.3.17.3 Modificadores**

Estos reactivos pueden ser de tres tipos: modificadores de pH, activadores y depresores.

**Modificadores de pH:** ácidos y bases (Ej. HCl, NaOH, etc.).

**Activadores:** Son reactivos químicos orgánicos o inorgánicos que ayudan al colector a adsorberse en la superficie del mineral a flotar.

**Depresores:** Son reactivos químicos orgánicos o inorgánicos que impiden la acción del colector en la superficie del mineral.

### **2.3.18 Variables del Proceso de Flotación**

Las variables que afectan el proceso de flotación de minerales son las siguientes (32):

- Granulometría de la mena.
- Tipo y dosificación de reactivos de flotación.
- Porcentaje de sólidos de las etapas de flotación.
- Tiempo de residencia del material en las celdas.
- pH de la pulpa.
- Aireación y acondicionamiento de la pulpa.
- Temperatura de la pulpa.
- Calidad del agua utilizada en el proceso.

### **2.3.19 Procesamiento de Carbón Mineral**

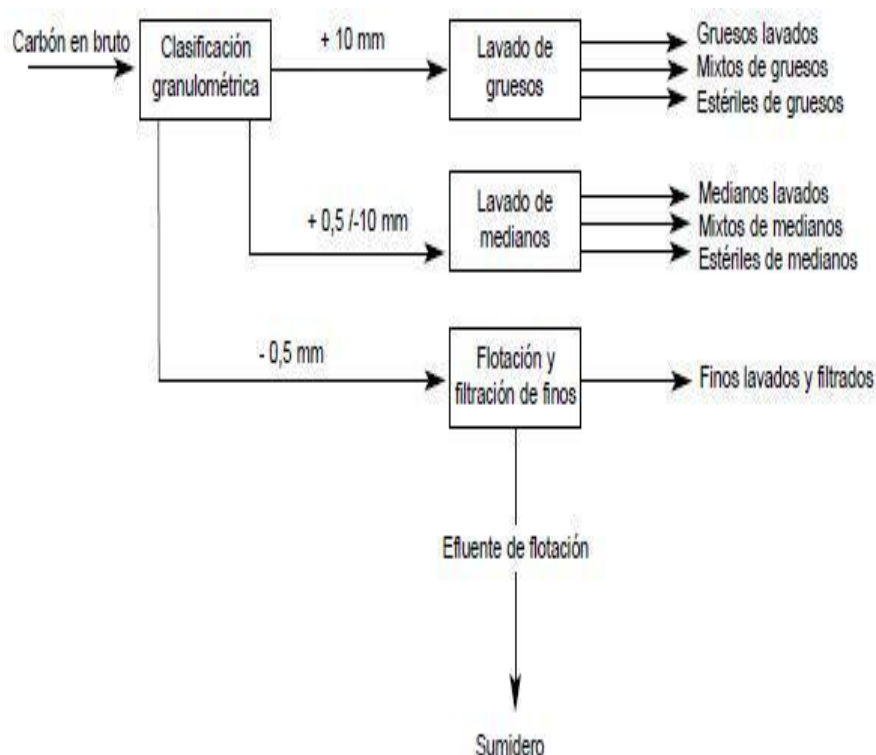
En esta parte se presentan, en el nivel conceptual, un grupo de operaciones y procesos recomendables para el procesamiento de carbón mineral. Cabe anotar que estos procesos deben desarrollarse dentro de una política de buena práctica operativa, tecnología limpia, seguridad laboral, cuidado del ambiente y responsabilidad social con el entorno poblacional.



### 2.3.19.1 Diagrama General de Clasificación y Lavado de Carbón Mineral

El carbón mineral que se extrae del yacimiento minero debe pasar por una etapa de clasificación granulométrica, produciendo tres corrientes de material de 10 mm, 0,5-10 mm y -0,5 mm, que corresponden a las corrientes de grueso, mediano y fino, respectivamente. De la corriente de lavado de gruesos se obtienen los productos de no minados gruesos lavados, mixtos de gruesos y estériles de gruesos.

De la corriente de lavado de medianos se obtienen los productos denominados medianos lavados, mixtos de medianos y estériles de medianos. El material fino pasa por una operación de flotación y filtración, dando como resultado dos productos: finos lavados y filtrados, y un efluente de flotación que se enviará a un sumidero, como se muestra en el gráfico 2.1.



**Gráfico 2.1. Diagrama conceptual de clasificación del carbón mineral.**  
**Fuente. Fernández, 1996. (7).**

### 2.3.19.2 Diagrama de Lavado y Clasificación de Carbón

En el gráfico 2.2 se presenta el esquema básico del lavado y clasificación de carbón mineral obtenido del yacimiento minero, con la finalidad de conseguir el carbón con diferente tamaño de partícula, clasificándolo en carbón grueso, carbón medio y carbón fino.

Esta clasificación se realiza en la tolva o depósito superior, donde se lleva a cabo la operación de flotación con agua del material carbonoso, para posteriormente desplazarlo por rebose a la rampa de filtros con mallas de diferente graduación.

También por el fondo de depósito se descargan las impurezas que trae el carbón en bruto.

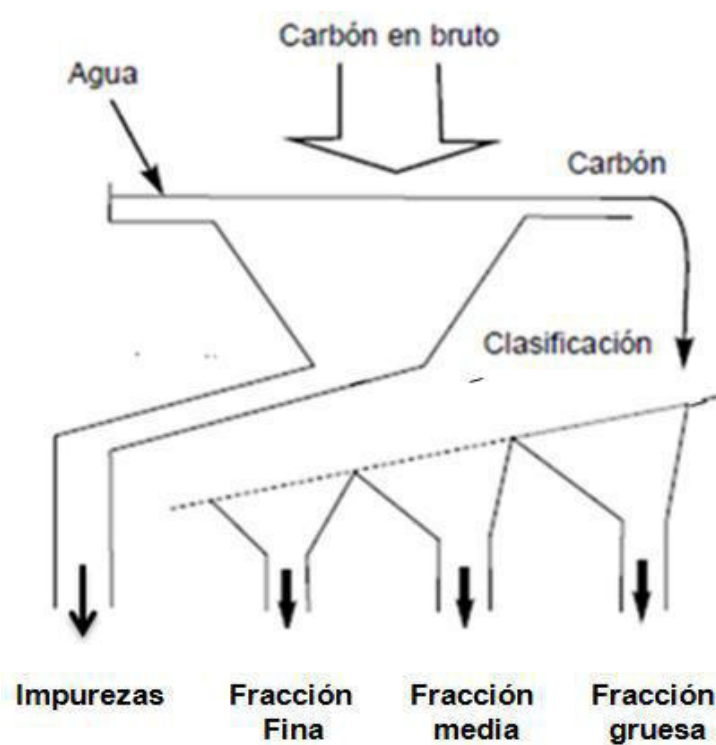


Gráfico 2.2. Unidad de lavado y clasificación del carbón.  
Fuente. Inusta, 2004(15).

## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA**

La metodología consiste en el muestreo sistemático del carbón mineral, para obtener una muestra representativa. La caracterización, análisis y pruebas metalúrgicas del carbón mineral se realizaron en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la UNMSM y en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química de la UNICA<sup>5</sup>.

Para el tratamiento de los datos se aplicó los balances metalúrgicos a fin de procesar e identificar la influencia de las variables, evaluar, interpretar y optimizar las variables en estudio, utilizando para ello los métodos estadísticos.

### **3.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN**

La investigación es experimental, deductiva y cuantitativa, porque se realizan pruebas metalúrgicas a nivel de laboratorio, tomando como base las teorías y antecedentes en el procesamiento de minerales.

Además se realiza la manipulación, análisis e interpretación de las variables independientes y dependiente; donde se aplican los conocimientos existentes como la caracterización del mineral, procesos gravimétricos y/o centrifugación, flotación y otros que nos conlleven a solucionar el problema planteado.

### **3.2 UNIDAD DE ANÁLISIS**

El análisis de unidad de investigación es el carbón mineral. Para efecto del presente estudio se trabajará con carbón mineral procedente de la mina San Alejandro N° 17.

---

<sup>5</sup> Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica.

### **3.3 POBLACIÓN DE ESTUDIO**

La población de estudio es el carbón mineral de la Empresa SMRL San Alejandro N°17 ubicado en el Distrito de Tomas, Provincia de Oyón, Región Lima.

Los estudios de la investigación y caracterización del mineral, se realizaron en los laboratorios de metalurgia de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Geológica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima y en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica.

### **3.4 TAMAÑO DE MUESTRA**

La cantidad muestras para los estudios correspondientes es de 100 Kg. Cada prueba a realizar es de 10 kg. se han realizado 5 pruebas metalúrgicas, 3 que son repetibles y el resto de la muestra queda como testigo y para las pruebas preliminares.

#### **3.4.1 Selección de Muestra**

La selección es importante, porque la muestra del carbón mineral tiene que ser representativa de todo el conjunto, por lo que se aplicarán las técnicas de muestreo.

Una vez obtenido la muestra representativa de 100 Kg. se pasó a la sala de muestras donde fueron reducidas a un tamaño adecuado y obtener muestras representativas para su estudio.

### **3.5 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

#### **3.5.1 Procedimiento Metodológico de la Investigación**

Para la recolección de datos se siguió la secuencia metodológica de la investigación que comprende (Anexo 2):

- Información bibliográfica respecto al carbón mineral y su problemática. de contaminación por azufre.

- Obtener una muestra representativa del carbón mineral.
- Análisis de la muestra representativa para determinar sus condiciones iniciales (Caracterización, tipos de entrelazamientos, tamaño de las partículas, etc.).
- Pruebas preliminares para determinar el método adecuado de disminución de azufre presente en el carbón mineral.
- Pruebas definitivas para determinar el método adecuado de disminución de azufre presente en el carbón mineral.
- Sistematizar los resultados obtenidos, mediante programas estadísticos.

### **3.5.2 *Análisis e Interpretación de Datos***

El tipo de análisis que se aplicó a la información recolectada en el trabajo, es el estadístico a nivel descriptivo - correlacionar.

Se calcularon las distribuciones de frecuencias, las medidas de tendencia central y de dispersión, y se elaboraron las representaciones gráficas correspondientes. Los datos y resultados se presentan a través de tablas y gráficos.

La comprobación de hipótesis se realizó aplicando la Prueba “t” Student, la misma que fue calculada con un nivel de significación del 95%. Para el análisis estadístico se utilizará el Paquete Estadístico SPSS<sup>6</sup>, versión 20.

### **3.5.3 *Tratamiento de las Muestras***

Las muestras de carbón mineral, fueron secadas en una estufa a temperaturas de 30 °C a 40 °C.

Para conocer la cantidad de material disponible para la investigación, utilizando la balanza A. Vandoni tipo B se obtuvo el peso bruto de las muestras (50 Kg de carbón mineral).

---

<sup>6</sup>Statistical Package for the Social Sciences. (Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales).

La clasificación se realizó en forma manual mediante un proceso de selección visual (pallaqueo) con el objeto de separar la fracción mineral del estéril.

La fracción mineral de cada muestra fue previamente homogenizada y cuarteada utilizando el cuarteador Jones de 12 aberturas y luego pasó por la trituradora de mandíbulas Denver de 2 a 3 cm. Las muestras fueron sometidas a conminución en el molino de rodillos Denver del tipo DA hasta obtener un  $d_{80}$  de 3 mm.

### 3.5.4 Caracterización

Para determinar las principales propiedades físicas, químicas y mineralógicas, se realizaron los siguientes ensayos (Ver anexo 3):

#### 3.5.4.1 Análisis Granulométrico

La finalidad es obtener una clasificación o distribución por tamaño de las partículas presentes en el carbón mineral y realizar las curvas granulométricas de cada muestra de carbón mineral, para ello se emplean tamices normalizados y numerados, colocados en orden decreciente.

*Tabla N° 3.1. Características de tamices (ASTM) utilizados.*

| N° TAMIZ (ASTM) | DIAMETRO ABERTURA (mm) | PESO (gr) A | PESO (%) %A | % ACUMULADO RETENIDO G(x) | % PASANTE RETENIDO F(x) |
|-----------------|------------------------|-------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| 60              | 0.25                   |             |             |                           |                         |
| 100             | 0.149                  |             |             |                           |                         |
| 140             | 0.105                  |             |             |                           |                         |
| 170             | 0.088                  |             |             |                           |                         |
| 200             | 0.074                  |             |             |                           |                         |
| - 200           |                        |             |             |                           |                         |
| Peso Total      |                        |             |             |                           |                         |

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 3.5.4.2 Análisis Físico

Los ensayos que se realizaron a las muestras de carbón mineral son: Color, lustre, Fractura, friabilidad, Dureza, densidad Real, densidad Aparente y Porosidad.

### 3.5.4.3 *Análisis Químico Inmediato*

Consiste en determinar el contenido de Humedad, Materia Volátil (MV), Carbón Fijo (CF) y Cenizas (Cz).

### 3.5.4.4 *Análisis Químico Elemental*

Este análisis es el que permite determinar la composición elemental de las sustancias orgánicas del carbón mineral en términos de contenido de: carbono, Hidrógeno, Nitrógeno, Azufre y Oxígeno por diferencia.

### 3.5.4.5 *Pruebas de Lavabilidad*

Antes de iniciar las pruebas de lavabilidad se realizó la conminución de tamaño del carbón mineral del total de la muestra seleccionada (100 Kg.), mediante operaciones sucesivas de división de la masa y reducción del tamaño de grano, en concordancia con las normas ASTM (Anexo 4).

Para las pruebas de lavabilidad, se utilizaron 50 Kg. de muestra a una malla +4 y -50 de la serie ASTM (10 Kg. por cada prueba) y soluciones preparadas con densidades de  $1.6 \text{ g/cm}^3$ , realizándose las pruebas de acuerdo al procedimiento estandarizado descrito en la Norma ASTM D4371-06 (AST, 2008) y siguiendo el sistema de elutriación modificado de acuerdo al siguiente diagrama.

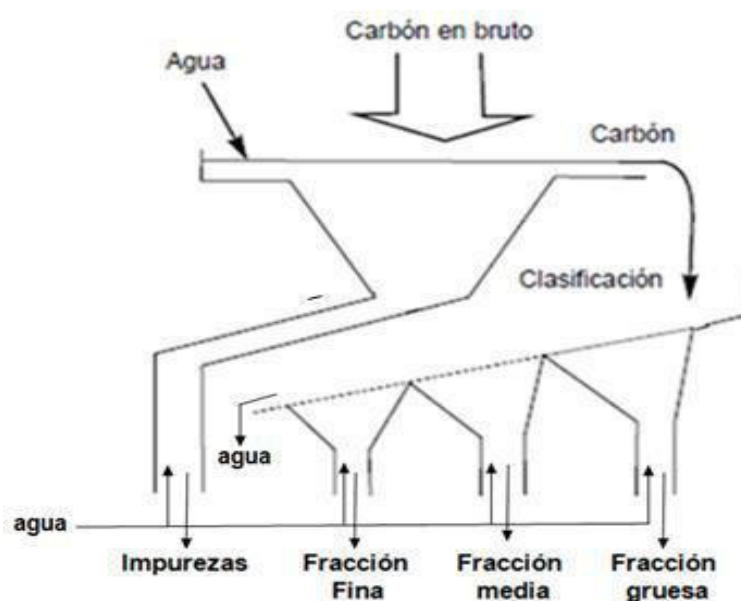


Gráfico 3.1. Unidad de lavado y clasificación del carbón propuesto.  
Fuente. Elaboración propia

Este circuito permite el lavado y la clasificación del carbón mineral. Las muestras obtenidas de cada lavado fueron secadas y preparadas para los análisis respectivos.

#### **3.5.4.6 Pruebas de Flotación**

Las muestras tratadas por lavabilidad, pasan cada una respectivamente a constituirse como muestras en la etapa de flotación.

Posteriormente, se tamizo para obtener una muestra 89%-200 mallas Tyler, y se procedió a su flotación.

Para ello, se usó una celda tipo Denver (Anexo 5) donde fue colocada la pulpa formada por carbón y agua, en una relación líquido / sólido de 3:2.

La pulpa es acondicionada durante 10 minutos, tiempo en el cual se agregó el colector (3g/Kg mineral) y el espumante (MIC, 0.6 g/Kg. mineral). Luego se procedió a flotar. La espuma flotada, el concentrado fue recolectado, secado y posteriormente analizado.

Las condiciones de preparación de cada muestra para la flotación son:

- ✓ Peso : 500 grs.
- ✓ Agua : 750 cc.
- ✓ Tiempo : 10 min.
- ✓ Relación L/S : 3/2
- ✓ Colector : kerosene 3 gr/Kg mineral.
- ✓ Espumante : Metil Isobutil Carbonil (MIC, 0.6 g/Kg mineral).

Las condiciones para el proceso de flotación son:

- ✓ Granulometría promedio : 89 a 93% a -200
- ✓ pH Inicial : 6
- ✓ pH Flotación : 8, 9 y 10
- ✓ Densidad de pulpa : 1040 gr/lit.
- ✓ Tiempo de acondicionamiento : 5 min.
- ✓ Tiempo de flotación : 5, 7 y 9 min.



✓ Espumante : Aceite de pino (2 gotas).

Los equipos empleados en la investigación de los procesos metalúrgicos son:

- ✓ Chancadora primaria y secundaria
- ✓ Molino de bolas
- ✓ Celdas de flotación
- ✓ Hornos mufla
- ✓ Crisoles de porcelana
- ✓ Estufa eléctrica
- ✓ Pulverizadora
- ✓ Balanza analítica
- ✓ Mallas

#### **3.5.4.7 Determinación de las Muestras**

Para los análisis se utilizó la fórmula: ( )

Unidad entera: 5 baterías.

Sub unidad : cada análisis de las combinaciones de pH y Tiempo.

En la tabla 3.2 se muestran la cantidad de análisis realizados y su respectiva codificación:

*Tabla 3.2: Cantidad de muestras a analizar.*

| pH | TIEMPO<br>(min.) | MUESTRA |        |        |        |        |
|----|------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
|    |                  | M1      | M2     | M3     | M4     | M5     |
| 8  | 5                | M1-85   | M2-85  | M3-85  | M4-85  | M5-85  |
|    | 7                | M1-87   | M2-87  | M3-87  | M4-87  | M5-87  |
|    | 9                | M1-89   | M2-89  | M3-89  | M4-89  | M5-89  |
| 9  | 5                | M1-95   | M2-95  | M3-95  | M4-95  | M5-95  |
|    | 7                | M1-97   | M2-97  | M3-97  | M4-97  | M5-97  |
|    | 9                | M1-99   | M2-99  | M3-99  | M4-99  | M5-99  |
| 10 | 5                | M1-105  | M2-105 | M3-105 | M4-105 | M5-105 |
|    | 7                | M1-107  | M2-107 | M3-107 | M4-107 | M5-107 |
|    | 9                | M1-109  | M2-109 | M3-109 | M4-109 | M5-109 |

*Fuente:* **Elaboración propia.**

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 ANÁLISIS DEL CARBÓN MINERAL

#### 4.1.1 *Análisis Granulométrico*

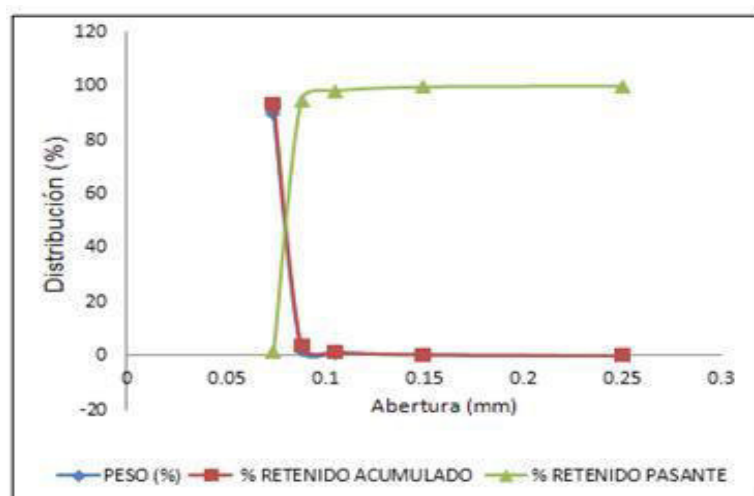
Se realizó la determinación del tamaño de partículas de 05 muestras de carbón mineral extraído de mina, para cada muestra representativa.

*Tabla N° 4.1. Promedio de Análisis granulométrico.*

| N° TAMIZ (ASTM) | DIAMETRO ABERTURA (mm) | PESO (gr) A | PESO (%) %A | % ACUMULADO RETENIDO G(x) | % PASANTE RETENIDO F(x) |
|-----------------|------------------------|-------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| 60              | 0.25                   | 0.00        | 0.00        | 0.00                      | 100.00                  |
| 100             | 0.149                  | 1.91        | 0.38        | 0.38                      | 99.62                   |
| 140             | 0.105                  | 5.04        | 1.01        | 1.39                      | 98.23                   |
| 170             | 0.088                  | 10.94       | 2.19        | 3.58                      | 94.65                   |
| 200             | 0.074                  | 449.66      | 89.93       | 93.51                     | 1.14                    |
| - 200           |                        | 32.45       | 6.49        | 100.00                    | 0.00                    |
| Peso Total      |                        | 500,00      | 100         |                           |                         |

*Fuente: Elaboración propia.*

*Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.*



**Gráfico 4.1. Distribución de tamaños de la muestra Promedio.**

*Fuente: Elaboración propia.*

*Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.*

#### 4.1.2 Análisis Físico

*Tabla 4.2. Promedio de Análisis físicos de las muestras de carbón.*

| MUESTRA | COLOR       | LUSTRE         | FRACTURA  | FRIABILIDAD | DUREZA | DENSIDAD APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> ) | DENSIDAD REAL (gr/cm <sup>3</sup> ) | POROSIDAD (%) |
|---------|-------------|----------------|-----------|-------------|--------|---|-------------------------------------|---------------|
| M-01    | Café Marrón | Opaco          | Irregular | Malo        | 1      | 1.107                                   | 1.57                                | 0.71          |
| M-02    | Negro       | Brillante      | Concoide  | Muy Buena   | 4      | 0.918                                   | 1.41                                | 0.85          |
| M-03    | Negro       | Opaco          | Concoide  | Buena       | 4      | 1.83                                    | 2.10                                | 0.87          |
| M-04    | Oscuro      | Opaco          | Cubos     | Buena       | 3      | 1.22                                    | 1.56                                | 0.78          |
| M-05    | Gris oscuro | Semi Brillante | Cubos     | Irregular   | 2      | 1.42                                    | 1.94                                | 0.73          |

*Fuente: Elaboración propia.*

*Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.*

#### 4.1.3 Análisis Inmediato

*Tabla 4.3. Análisis inmediatos del carbón mineral.*

| MUESTRA  | HUMEDAD (%) | MATERIA VOLATIL (%) | CENIZA (%) | CARBON FIJO (%) |
|----------|-------------|---------------------|------------|-----------------|
| M-01     | 0.87        | 19.42               | 18.47      | 58.85           |
| M-02     | 0.73        | 19.32               | 16.45      | 61.83           |
| M-03     | 0.69        | 18.68               | 16.13      | 61.09           |
| M-04     | 0.84        | 17.56               | 18.72      | 59.64           |
| M-05     | 0.78        | 18.67               | 16.89      | 59.78           |
| Promedio | 0.78        | 18.73               | 17.33      | 60.24           |

*Fuente: Elaboración propia.*

*Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.*

#### 4.1.4 *Análisis Elemental*

*Tabla 4.4. Análisis elementales de las muestras de carbón.*

| BASE RECIBIDA |       |       |       |       |       |          |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| UNIDAD (%)    | M-01  | M-02  | M-03  | M-04  | M-05  | PROMEDIO |
| CARBONO       | 62,9  | 61,37 | 61,28 | 62,43 | 61,49 | 61,894   |
| HIDROGENO     | 4,02  | 4,46  | 4,37  | 3,98  | 3,95  | 4,156    |
| NITROGENO     | 0,68  | 0,72  | 0,64  | 0,68  | 0,71  | 0,686    |
| AZUFRE        | 2,19  | 2,25  | 2,21  | 2,18  | 2,24  | 2,214    |
| OXIGENO       | 23,5  | 23,82 | 24,39 | 24,56 | 24,29 | 24,112   |
| BASE SECA     |       |       |       |       |       |          |
| UNIDAD (%)    | M-01  | M-02  | M-03  | M-04  | M-05  | PROMEDIO |
| CARBONO       | 63,24 | 62,74 | 62,43 | 63,09 | 62,74 | 62,85    |
| HIDROGENO     | 4,24  | 4,71  | 4,82  | 4,13  | 4,18  | 4,42     |
| NITROGENO     | 0,71  | 0,74  | 0,69  | 0,72  | 0,75  | 0,72     |
| AZUFRE        | 2,26  | 2,31  | 2,28  | 2,26  | 2,34  | 2,29     |
| OXIGENO       | 24,7  | 24,94 | 24,99 | 24,86 | 24,78 | 24,85    |

*Fuente: Elaboración propia.*

*Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.*

#### 4.1.5 *Poder Calorífico*

*Tabla 4.5. Poder calorífico de las muestras del carbón mineral.*

| PODER CALORÍFICO - BASE RECIBIDA |         |         |         |         |         |          |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
|                                  | M-01    | M-02    | M-03    | M-04    | M-05    | PROMEDIO |
| Superior (Kcal/Kg)               | 7242.86 | 7232.36 | 7243.86 | 7251.45 | 7247.26 | 7243.59  |
| Inferior (Kcal/Kg)               | 7229.38 | 7226.62 | 7233.89 | 7243.61 | 7236.84 | 7234.07  |
| PODER CALORÍFICO - BASE SECA     |         |         |         |         |         |          |
| Superior (Kcal/Kg)               | 7254.29 | 7247.28 | 7256.29 | 7267.39 | 7261.28 | 7257.31  |
| Inferior (Kcal/Kg)               | 7238.86 | 7236.91 | 7242.11 | 7232.76 | 7248.38 | 7239.80  |

*Fuente: Elaboración propia.*

*Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.*



#### 4.1.6 *Análisis Microscópico de la Muestra*

Para el análisis microscópico se ha tomado el promedio de las cinco muestras. El análisis microscópico de la muestra de carbón, indica como resultado lo siguiente:

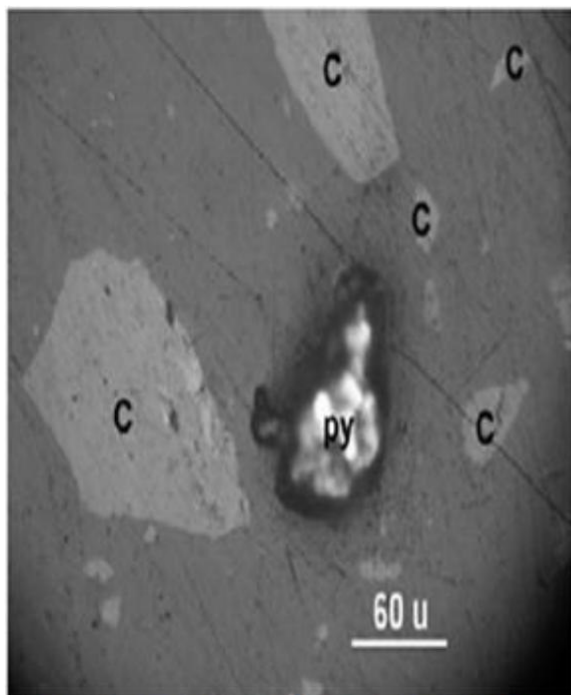


Gráfico 4.2. Partículas libres de grafito (C) y pirita (py). 200X

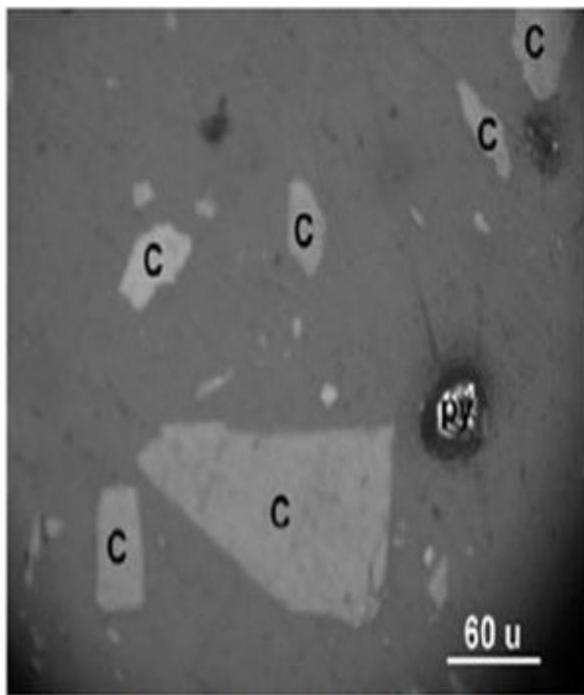


Gráfico 4.3. Partículas libres de grafito (C) y pirita (py). 200X

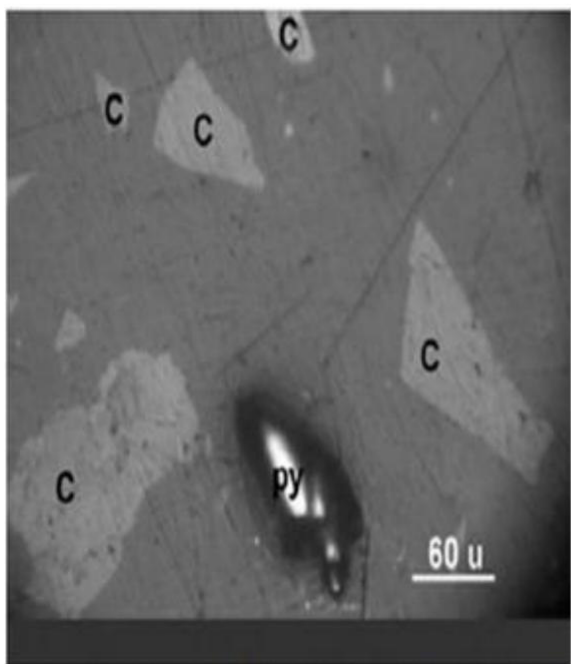


Gráfico 4.4. Partículas libres de grafito (C) y pirita (py). 200X

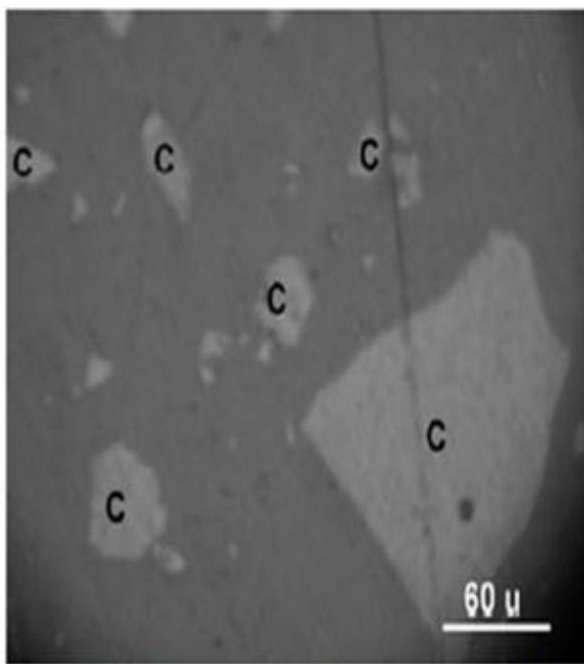


Gráfico 4.5: Partículas libres de grafito (C) y pirita (py). 200X

Fuente: **Elaboración propia.**

Elaborado en los Laboratorios de la FIGMMG-UNMSM

## 4.2 TRATAMIENTO DEL CARBÓN MINERAL POR LAVABILIDAD

### 4.2.1 Análisis Granulométrico

Tabla N° 4.6. Análisis de Tamices M-Promedio con H<sub>2</sub>O.

| N° TAMIZ (ASTM) | DIAMETRO ABERTURA (mm) | PESO (gr) A | PESO (%) %A | % ACUMULADO RETENIDO G(x) | % PASANTE RETENIDO F(x) |
|-----------------|------------------------|-------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| 60              | 0.25                   | 0.00        | 0.00        | 0.00                      | 100.00                  |
| 100             | 0.149                  | 0.98        | 0.20        | 0.20                      | 99.80                   |
| 140             | 0.105                  | 1.25        | 0.25        | 0.45                      | 99.36                   |
| 170             | 0.088                  | 1.67        | 0.33        | 0.78                      | 98.58                   |
| 200             | 0.074                  | 470.65      | 94.13       | 94.91                     | 3.67                    |
| - 200           |                        | 25.45       | 5.09        | 100                       | 0.00                    |
| Peso Total      |                        | 500,00      | 100         |                           |                         |

Fuente: **Elaboración propia.**

Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.

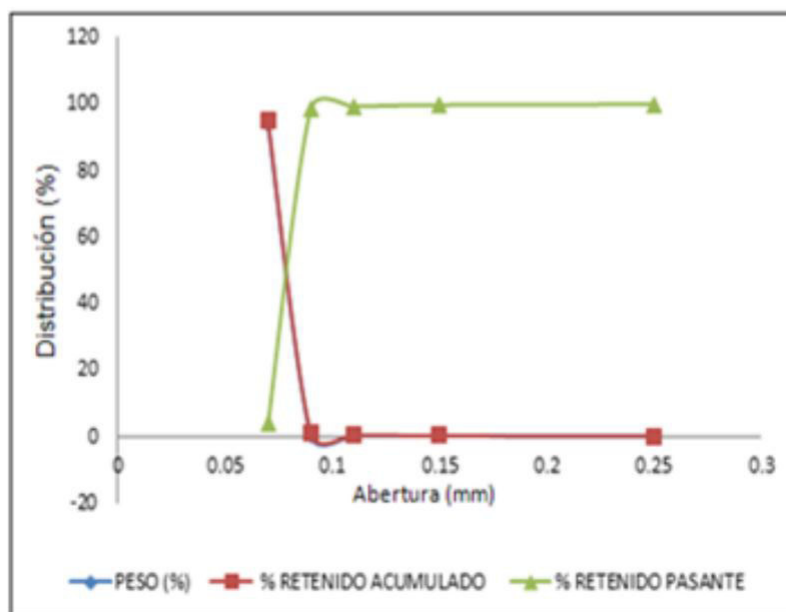


Gráfico 4.6. Distribución de tamaños Promedio con H<sub>2</sub>O.

Fuente: **Elaboración propia.**

#### 4.2.2 Análisis Físico Tratado con Agua

Tabla 4.7. Colores de las muestras de carbón mineral tratados con H<sub>2</sub>O.

| MUESTRA | H <sub>2</sub> O |
|---------|------------------|
| M-01    | Gris oscuro      |
| M-02    | Negro            |
| M-03    | Gris oscuro      |
| M-04    | Gris oscuro      |
| M-05    | Gris oscuro      |

Fuente: Elaboración propia.

Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.

#### 4.2.3 Análisis Inmediato del Tratamiento por Lavabilidad

Tabla 4.8. Análisis inmediato de las muestras de carbón mineral tratado con H<sub>2</sub>O.

| MUESTRA  | HUMEDAD (%) |        | MATERIA VOLATIL (%) |        | CENIZA (%) |        | CARBON FIJO (%) |        | AZUFRE (%) |        |
|----------|-------------|--------|---------------------|--------|------------|--------|-----------------|--------|------------|--------|
|          | INICIAL     | LAVADO | INICIAL             | LAVADO | INICIAL    | LAVADO | INICIAL         | LAVADO | INICIAL    | LAVADO |
| M-01     | 0.87        | 0.63   | 19.42               | 18.82  | 18.47      | 16.36  | 58.85           | 62.12  | 2,26       | 2.23   |
| M-02     | 0.73        | 0.61   | 19.32               | 19.25  | 16.45      | 16.42  | 61.83           | 62.10  | 2,31       | 2.26   |
| M-03     | 0.69        | 0.59   | 18.68               | 18.44  | 16.13      | 15.75  | 61.09           | 63.33  | 2,28       | 2.23   |
| M-04     | 0.84        | 0.65   | 17.56               | 18.38  | 18.72      | 17.14  | 59.64           | 62.11  | 2,26       | 2.21   |
| M-05     | 0.78        | 0.67   | 18.67               | 18.38  | 16.89      | 16.52  | 59.78           | 62.48  | 2,34       | 2.28   |
| Promedio | 0.78        | 0.63   | 18.73               | 18.65  | 17.33      | 16.44  | 60.24           | 62.43  | 2,29       | 2.24   |

Fuente: Elaboración propia.

Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.

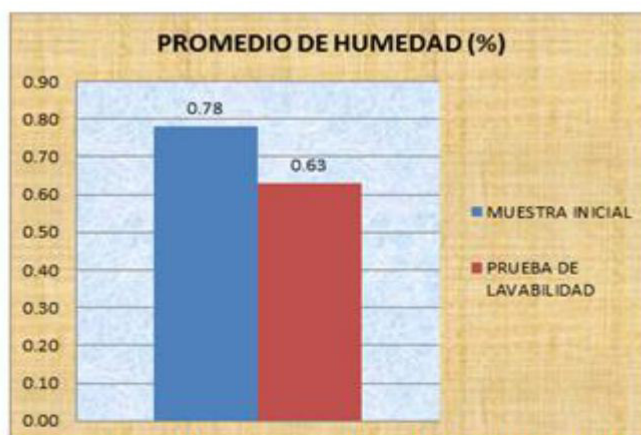
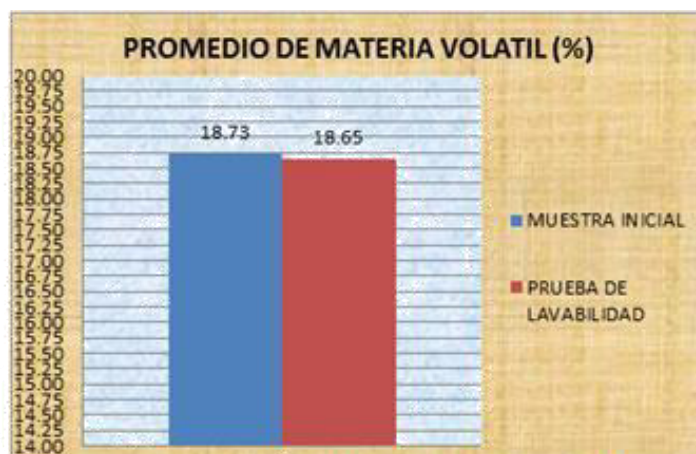


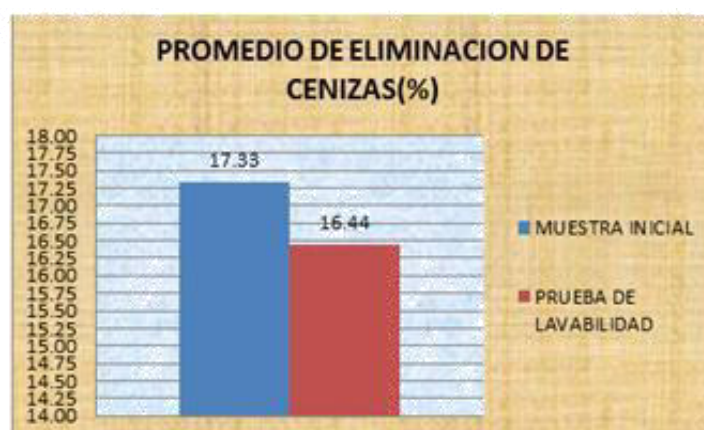
Gráfico 4.7. Promedio Comparativo del Análisis de Humedad.

Fuente: Elaboración propia.

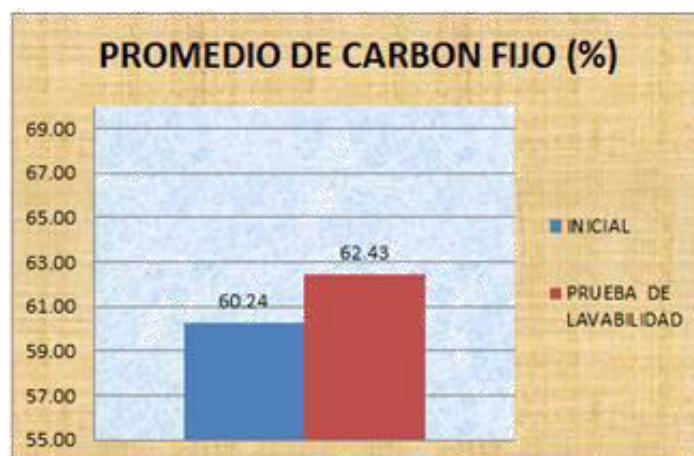




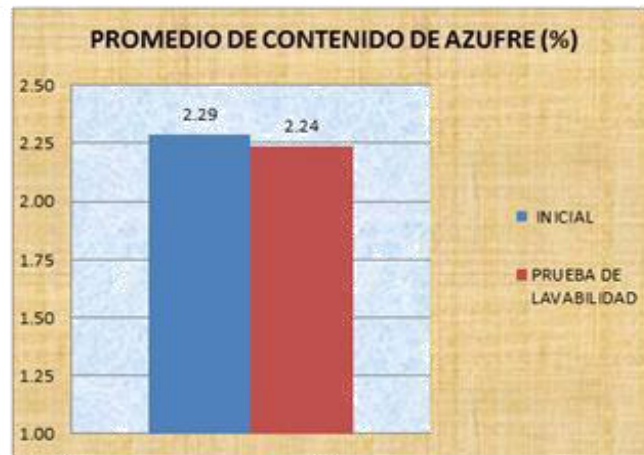
*Gráfico 4.8. Promedio Comparativo del Análisis de Materia Volátil.*  
*Fuente: Elaboración propia.*



*Gráfico 4.9. Promedio Comparativo del Análisis de cenizas.*  
*Fuente: Elaboración propia.*



*Gráfico 4.10. Promedio Comparativo del Análisis de Carbón Fijo.*  
*Fuente: Elaboración propia.*



*Gráfico 4.11. Promedio Comparativo del Análisis de Azufre.*  
Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 PRUEBAS DE TRATAMIENTO POR FLOTACIÓN

Los resultados de las pruebas metalúrgicas de flotación se expresan en las siguientes tablas y gráficos, (Adicionalmente ver anexo 6).

*Tabla 4.9. Promedio de muestras a pH 8 y 5 min.*

| MUESTRA         | MATERIA VOLATIL (%) | CENIZAS (%)   | CARBON FIJO (%) | PODER CALORIFICO (Kcal/Kg) | AZUFRE (%)   |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------|----------------------------|--------------|
| M1-85           | 18,82               | 16,07         | 62,12           | 7254,29                    | 2,23         |
| M2-85           | 19,25               | 16,21         | 62,10           | 7247,28                    | 2,26         |
| M3-85           | 18,44               | 16,21         | 62,10           | 7247,28                    | 2,26         |
| M4-85           | 18,38               | 17,04         | 62,11           | 7267,39                    | 2,21         |
| M5-85           | 18,38               | 16,48         | 62,48           | 7261,28                    | 2,28         |
| <b>PROMEDIO</b> | <b>18,654</b>       | <b>16,402</b> | <b>62,182</b>   | <b>7255,504</b>            | <b>2,248</b> |

Fuente: Elaboración propia.  
Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.

*Tabla 4.10. Promedio de muestras a pH 8 y 7 min.*

| MUESTRA         | MATERIA VOLATIL (%) | CENIZAS (%)   | CARBON FIJO (%) | PODER CALORIFICO (Kcal/Kg) | AZUFRE (%)   |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------|----------------------------|--------------|
| M1-87           | 18,82               | 15,85         | 62,12           | 7254,29                    | 2,23         |
| M2-87           | 19,25               | 16,09         | 62,1            | 7247,28                    | 2,26         |
| M3-87           | 18,44               | 15,62         | 63,33           | 7256,29                    | 2,23         |
| M4-87           | 18,38               | 16,97         | 62,11           | 7267,39                    | 2,21         |
| M5-87           | 18,38               | 16,43         | 62,48           | 7261,28                    | 2,28         |
| <b>PROMEDIO</b> | <b>18,654</b>       | <b>16,192</b> | <b>62,428</b>   | <b>7257,306</b>            | <b>2,242</b> |

Fuente: Elaboración propia.  
Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.

**Tabla 4.11. Promedio de muestras a pH 8 y 9 min.**

| MUESTRA         | MATERIA VOLATIL (%) | CENIZAS (%)   | CARBON FIJO (%) | PODER CALORIFICO (Kcal/Kg) | AZUFRE (%)   |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------|----------------------------|--------------|
| M1-89           | 18,82               | 15,79         | 62,12           | 7254,29                    | 2,23         |
| M2-89           | 19,25               | 15,94         | 62,1            | 7247,28                    | 2,26         |
| M3-89           | 18,44               | 15,47         | 63,33           | 7256,29                    | 2,23         |
| M4-89           | 18,38               | 16,87         | 62,11           | 7267,39                    | 2,21         |
| M5-89           | 18,38               | 16,32         | 62,48           | 7261,28                    | 2,28         |
| <b>PROMEDIO</b> | <b>18,654</b>       | <b>16,078</b> | <b>62,428</b>   | <b>7257,306</b>            | <b>2,242</b> |

*Fuente:* Elaboración propia.

*Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.*

**Tabla 4.12. Promedio de muestras a pH 9 y 5 min.**

| MUESTRA         | MATERIA VOLATIL (%) | CENIZAS (%)   | CARBON FIJO (%) | PODER CALORIFICO (Kcal/Kg) | AZUFRE (%)   |
|-----------------|---------------------|---------------|-----------------|----------------------------|--------------|
| M1-95           | 18,82               | 14,76         | 62,12           | 7254,29                    | 2,23         |
| M2-95           | 19,25               | 15,85         | 62,1            | 7247,28                    | 2,26         |
| M3-95           | 18,44               | 15,38         | 63,33           | 7256,29                    | 2,23         |
| M4-95           | 18,38               | 16,45         | 62,11           | 7267,39                    | 2,21         |
| M5-95           | 18,38               | 16,29         | 62,48           | 7261,28                    | 2,28         |
| <b>PROMEDIO</b> | <b>18,654</b>       | <b>15,746</b> | <b>62,428</b>   | <b>7257,306</b>            | <b>2,242</b> |

*Fuente:* Elaboración propia.

*Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.*

**Tabla 4.13. Promedio de muestras a pH 9 y 7 min.**

| MUESTRA         | MATERIA VOLATIL (%) | CENIZAS (%)  | CARBON FIJO (%) | PODER CALORIFICO (Kcal/Kg) | AZUFRE (%)  |
|-----------------|---------------------|--------------|-----------------|----------------------------|-------------|
| M1-97           | 18,25               | 14,27        | 64,67           | 7254,29                    | 2,23        |
| M2-97           | 18,02               | 15,79        | 64,34           | 7247,28                    | 2,2         |
| M3-97           | 18,13               | 15,12        | 65,86           | 7256,29                    | 2,13        |
| M4-97           | 18,28               | 15,11        | 64,61           | 7312,64                    | 2,13        |
| M5-97           | 18,35               | 14,65        | 65,32           | 7292,75                    | 2,21        |
| <b>PROMEDIO</b> | <b>18,21</b>        | <b>14,99</b> | <b>64,96</b>    | <b>7272,65</b>             | <b>2,18</b> |

*Fuente:* Elaboración propia.

*Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.*



**Tabla 4.14. Promedio de muestras a pH 9 y 9 min.**

| MUESTRA         | MATERIA VOLATIL | CENIZAS       | CARBON FIJO   | PODER CALORIFICO (Kcal/Kg) | AZUFRE      |
|-----------------|-----------------|---------------|---------------|----------------------------|-------------|
| M1-99           | 18.06           | 12,36         | 65,89         | 7286,52                    | 2,21        |
| M2-99           | 18.12           | 14,11         | 66,78         | 7286,69                    | 2,12        |
| M3-99           | 18.03           | 14,67         | 67,12         | 7278,52                    | 2,02        |
| M4-99           | 18.14           | 14,23         | 67,23         | 7347,81                    | 2,07        |
| M5-99           | 18.21           | 13,21         | 66,89         | 7341,38                    | 2,18        |
| <b>PROMEDIO</b> | <b>18.11</b>    | <b>13,716</b> | <b>66,782</b> | <b>7308,184</b>            | <b>2,12</b> |

*Fuente: Elaboración propia.*

*Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.*

**Tabla 4.15. Promedio de muestras a pH 10 y 5 min.**

| MUESTRA         | MATERIA VOLATIL (%) | CENIZAS (%) | CARBON FIJO (%) | PODER CALORIFICO (Kcal/Kg) | AZUFRE (%)  |
|-----------------|---------------------|-------------|-----------------|----------------------------|-------------|
| M1-105          | 18.07               | 7.64        | 72,62           | 8172,1                     | 1,47        |
| M2-105          | 17.92               | 7.94        | 74,13           | 8047,11                    | 1,37        |
| M3-105          | 18.13               | 7.59        | 75,33           | 8191,29                    | 1,44        |
| M4-105          | 18.12               | 7.21        | 71,49           | 8142,64                    | 1,41        |
| M5-105          | 17.92               | 7.28        | 71,39           | 8150,15                    | 1,41        |
| <b>PROMEDIO</b> | <b>18.03</b>        | <b>7.53</b> | <b>72,992</b>   | <b>8140,658</b>            | <b>1,42</b> |

*Fuente: Elaboración propia.*

*Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.*

**Tabla 4.16. Promedio de muestras a pH 10 y 7 min.**

| MUESTRA         | MATERIA VOLATIL (%) | CENIZAS (%) | CARBON FIJO (%) | PODER CALORIFICO (Kcal/Kg) | AZUFRE (%)  |
|-----------------|---------------------|-------------|-----------------|----------------------------|-------------|
| M1-107          | 17.78               | 7.43        | 72,65           | 8172,14                    | 1,47        |
| M2-107          | 17.75               | 7.65        | 74,13           | 8047,11                    | 1,37        |
| M3-107          | 17.83               | 7.28        | 75,33           | 8191,29                    | 1,44        |
| M4-107          | 17.72               | 7.2         | 71,49           | 8142,64                    | 1,41        |
| M5-107          | 17.81               | 7.16        | 71,39           | 8152,96                    | 1,41        |
| <b>PROMEDIO</b> | <b>17.78</b>        | <b>7.34</b> | <b>72,998</b>   | <b>8141,228</b>            | <b>1,42</b> |

*Fuente: Elaboración propia.*

*Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.*

Tabla 4.17. Promedio de muestras a pH 10 y 9 min.

| MUESTRA  | MATERIA VOLATIL (%) | CENIZAS (%) | CARBON FIJO (%) | PODER CALORIFICO (Kcal/Kg) | AZUFRE (%) |
|----------|---------------------|-------------|-----------------|----------------------------|------------|
| M1-109   | 17.75               | 7.43        | 72,65           | 8172,14                    | 1,47       |
| M2-109   | 17.76               | 7.63        | 74,13           | 8047,11                    | 1,37       |
| M3-109   | 17.83               | 7.26        | 75,33           | 8191,29                    | 1,44       |
| M4-109   | 17.75               | 7.2         | 71,49           | 8142,64                    | 1,41       |
| M5-109   | 17.82               | 7.18        | 71,4            | 8152,96                    | 1,41       |
| PROMEDIO | 17.78               | 7,34        | 73              | 8141,228                   | 1,42       |

Fuente: Elaboración propia.

Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.

Tabla 4.18. Resumen del Promedio de muestras.

| CONDICION |              | MATERIA VOLATIL (%) | CENIZAS (%) | CARBON FIJO (%) | PODER CALORIFICO (Kcal/Kg) | AZUFRE (%) |
|-----------|--------------|---------------------|-------------|-----------------|----------------------------|------------|
| pH        | TIEMPO (min) |                     |             |                 |                            |            |
| 8         | 5            | 18,65               | 16,40       | 62,12           | 7255,50                    | 2,23       |
|           | 7            | 18,65               | 16,19       | 62,43           | 7257,31                    | 2,24       |
|           | 9            | 18,65               | 16,08       | 62,43           | 7257,31                    | 2,24       |
| 9         | 5            | 18,65               | 15,75       | 62,43           | 7257,31                    | 2,24       |
|           | 7            | 18,21               | 14,99       | 64,96           | 7272,65                    | 2,18       |
|           | 9            | 18,11               | 13,72       | 66,78           | 7308,18                    | 2,12       |
| 10        | 5            | 18,03               | 7,53        | 72,99           | 8140,66                    | 1,42       |
|           | 7            | 17,78               | 7,34        | 73,00           | 8141,23                    | 1,42       |
|           | 9            | 17,78               | 7,34        | 73,00           | 8141,23                    | 1,42       |

Fuente: Elaboración propia.

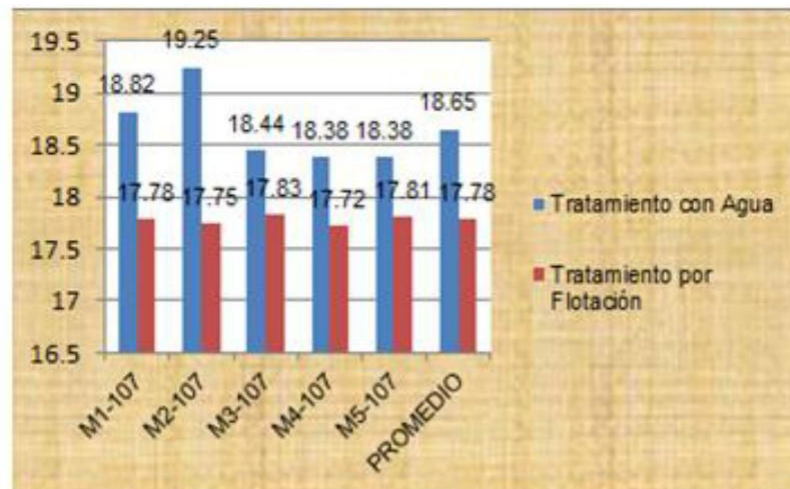
Tabla 4.19. Resumen comparativo de Tratamiento con Agua y flotada a pH 10 y 7 min.

| MUESTRA  | MATERIA VOLATIL (%) |       | CENIZAS (%) |      | CARBON FIJO (%) |       | PODER CALORIFICO (Kcal/Kg) |         | AZUFRE (%) |      |
|----------|---------------------|-------|-------------|------|-----------------|-------|----------------------------|---------|------------|------|
|          | T1*                 | T2**  | T1*         | T2** | T1*             | T2**  | T1*                        | T2**    | T1*        | T2** |
| M1-107   | 18.82               | 17.78 | 16.36       | 7.43 | 62.12           | 72.65 | 7254.29                    | 8172.14 | 2.23       | 1.47 |
| M2-107   | 19.25               | 17.75 | 16.42       | 7.65 | 62.1            | 74.13 | 7247.28                    | 8047.11 | 2.26       | 1.37 |
| M3-107   | 18.44               | 17.83 | 15.75       | 7.28 | 63.33           | 75.33 | 7256.29                    | 8191.29 | 2.23       | 1.44 |
| M4-107   | 18.38               | 17.72 | 17.14       | 7.2  | 62.11           | 71.49 | 7267.39                    | 8142.64 | 2.21       | 1.41 |
| M5-107   | 18.38               | 17.81 | 16.52       | 7.16 | 62.48           | 71.39 | 7261.28                    | 8152.96 | 2.28       | 1.41 |
| PROMEDIO | 18.65               | 17.78 | 16.44       | 7.34 | 62.43           | 73.00 | 7257.31                    | 8141.23 | 2.24       | 1.42 |

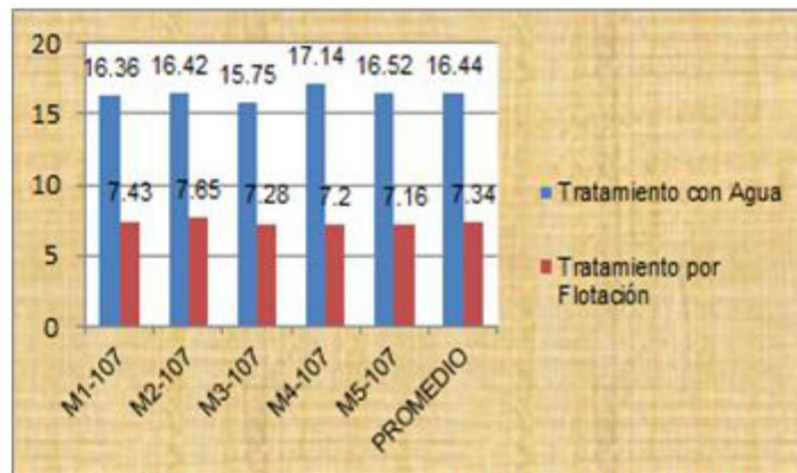
Fuente: Elaboración propia.

\* Tratamiento con Agua.

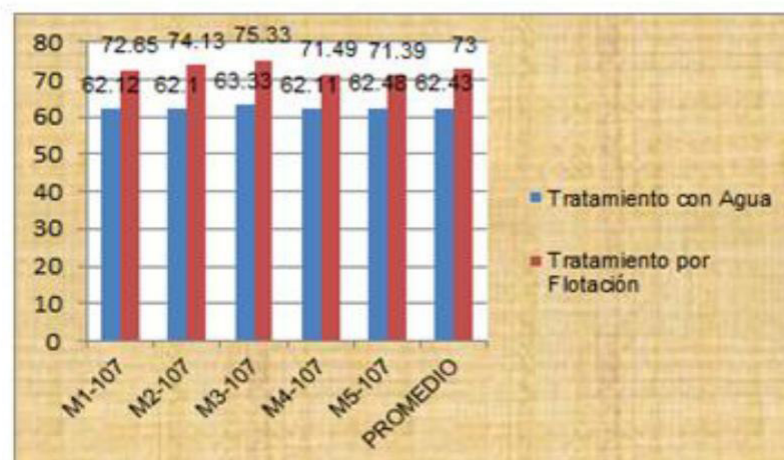
\*\*Tratamiento por Flotación.



**Gráfico 4.12. Estudio comparativo de Materia Volátil (%).**  
Fuente: Elaboración propia.



**Gráfico 4.13. Estudio comparativo de cenizas (%).**  
Fuente: Elaboración propia.



**Gráfico 4.14. Estudio comparativo de Carbón Fijo (%).**  
Fuente: Elaboración propia.



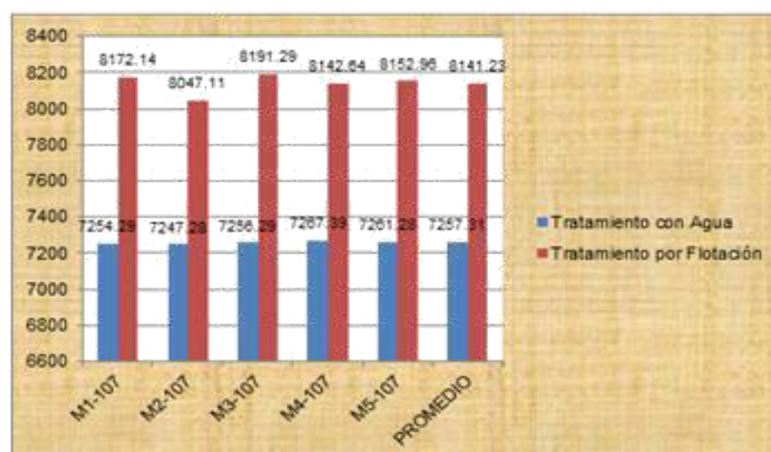


Gráfico 4.15. Estudio comparativo del Poder calorífico (Kcal/Kg).  
Fuente: Elaboración propia.

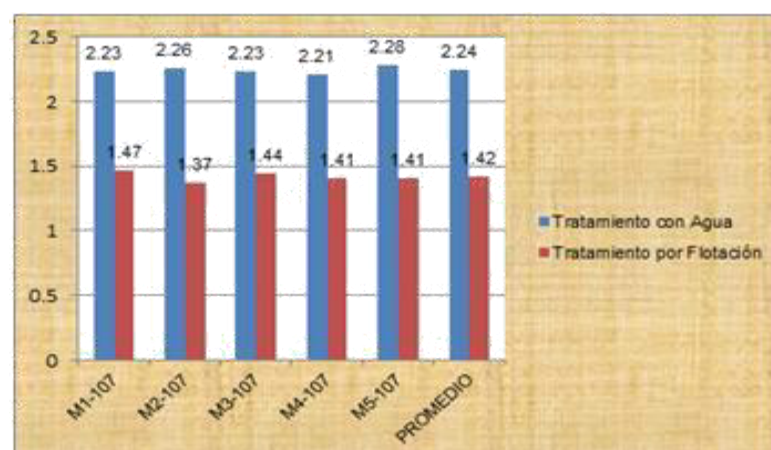
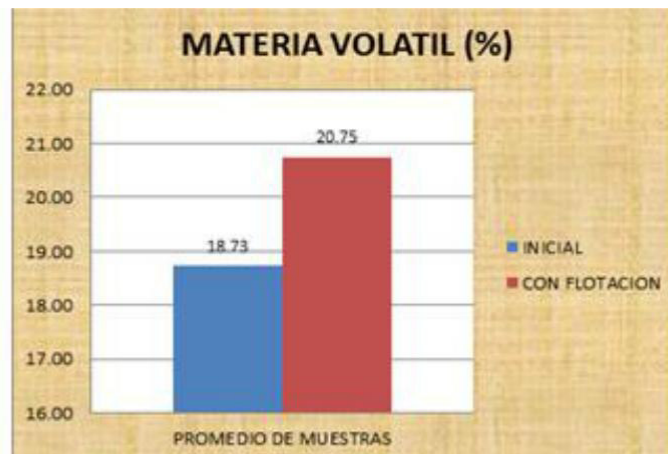


Gráfico 4.16. Estudio comparativo de Azufre (%).  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.20. Comparación de muestra inicial y muestra flotada a pH 10 y 7 min.

| MUESTRA  | MATERIA VOLATIL (%) |       | CENIZA (%) |       | CARBON FIJO (%) |       | PODER CALORIFICO (Kcal/Kg) |         | AZUFRE (%) |       |
|----------|---------------------|-------|------------|-------|-----------------|-------|----------------------------|---------|------------|-------|
|          | INICIAL             | FLOT. | INICIAL    | FLOT. | INICIAL         | FLOT. | INICIAL                    | FLOT.   | INICIAL    | FLOT. |
| M-01     | 19.42               | 17.78 | 18.47      | 7.43  | 58.85           | 72.65 | 7254.29                    | 8172.14 | 2,26       | 1.47  |
| M-02     | 19.32               | 17.75 | 16.45      | 7.65  | 61.83           | 74.13 | 7247.28                    | 8047.11 | 2,31       | 1.37  |
| M-03     | 18.68               | 17.83 | 16.13      | 7.28  | 61.09           | 75.33 | 7156.29                    | 8191.29 | 2,28       | 1.44  |
| M-04     | 17.56               | 17.72 | 18.72      | 7.2   | 59.64           | 71.49 | 7267.39                    | 8142.64 | 2,26       | 1.41  |
| M-05     | 18.67               | 17.81 | 16.89      | 7.16  | 59.78           | 71.39 | 7261.28                    | 8152.96 | 2,34       | 1.41  |
| Promedio | 18.73               | 17.78 | 17.33      | 7.34  | 60.24           | 73.00 | 7257.31                    | 8141.23 | 2,29       | 1.42  |

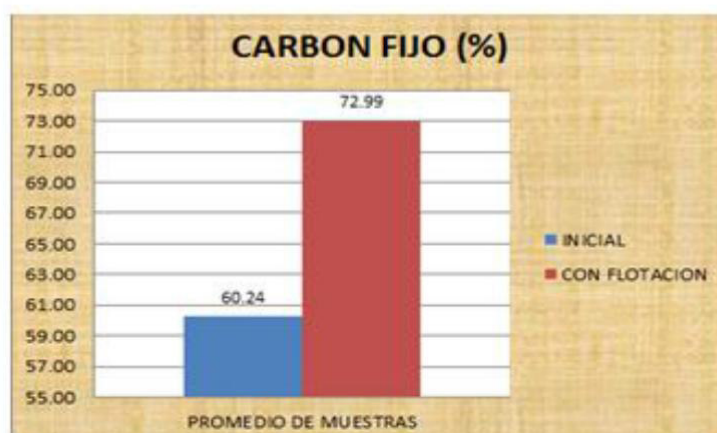
Fuente: Elaboración propia.



**Gráfico 4.17. Comparativo de Materia Volátil Promedio de Flotación**  
*Fuente: Elaboración propia.*



**Gráfico 4.18. Comparativo de Cenizas promedio de Flotación.**  
*Fuente: Elaboración propia.*



**Gráfico 4.19. Comparativo de Carbón Fijo promedio de Flotación.**  
*Fuente: Elaboración propia.*





Gráfico 4.20. Comparativo del Poder Calorífico promedio de Flotación.  
Fuente: Elaboración propia.



Gráfico 4.21. Comparativo del Contenido de Azufre promedio de flotación.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.21. Análisis Químico Elemental de las muestras flotadas.

| UNIDAD (%) | M-01  | M-02  | M-03   | M-04  | M-05  | PROMEDIO |
|------------|-------|-------|--------|-------|-------|----------|
| CARBONO    | 71.32 | 71.97 | 72.116 | 71.09 | 71.36 | 71.57    |
| HIDROGENO  | 4.73  | 4.97  | 4.99   | 4.61  | 4.52  | 4.76     |
| NITROGENO  | 0.71  | 0.74  | 0.69   | 0.72  | 0.75  | 0.72     |
| AZUFRE     | 1.47  | 1.37  | 1.44   | 1.41  | 1.41  | 1.42     |
| OXIGENO    | 29.14 | 29.76 | 30.11  | 29.84 | 29.69 | 29.71    |

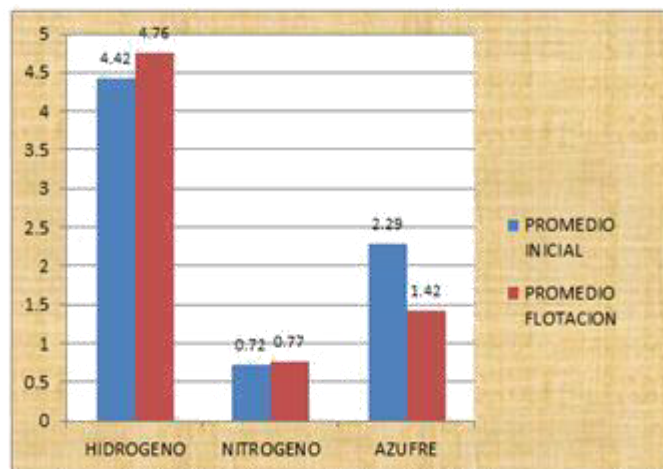
Fuente: Elaboración propia.

Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.

**Tabla 4.22. Comparativo del Análisis Químico Elemental de las muestras inicial y flotadas.**

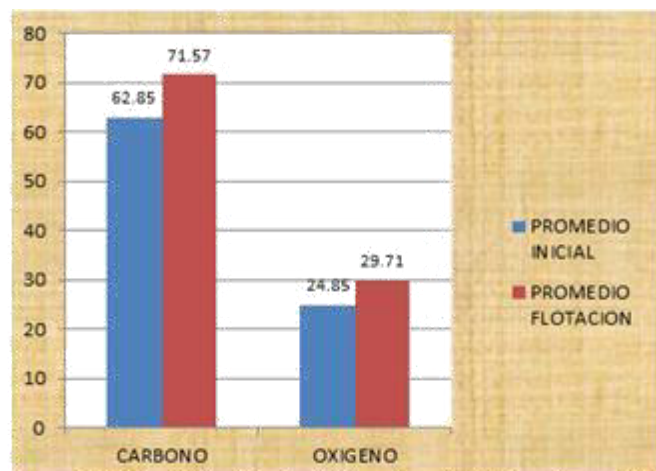
| UNIDAD (%) | M-01    |       | M-02    |       | M-03    |       | M-04    |       | M-05    |       | PROMEDIO |       |
|------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|----------|-------|
|            | INICIAL | FLOT. | INICIAL | FLOT. | INICIAL | FLOT. | INICIAL | FLOT. | INICIAL | FLOT. | INICIAL  | FLOT. |
| CARBONO    | 63.24   | 71.32 | 62.74   | 71.97 | 62.43   | 72.12 | 63.09   | 71.09 | 62.74   | 71.36 | 62.85    | 71.57 |
| HIDROGENO  | 4.24    | 4.73  | 4.71    | 4.97  | 4.82    | 4.99  | 4.13    | 4.61  | 4.18    | 4.52  | 4.42     | 4.76  |
| NITROGENO  | 0.71    | 0.75  | 0.74    | 0.79  | 0.69    | 0.74  | 0.72    | 0.77  | 0.75    | 0.79  | 0.72     | 0.77  |
| AZUFRE     | 2.26    | 1.47  | 2.31    | 1.37  | 2.28    | 1.44  | 2.26    | 1.41  | 2.34    | 1.41  | 2.29     | 1.42  |
| OXIGENO    | 24.70   | 29.14 | 24.94   | 29.76 | 24.99   | 30.11 | 24.86   | 29.84 | 24.78   | 29.69 | 24.85    | 29.71 |

Fuente: Elaboración propia.



**Gráfico 4.22. Comparativo de los promedios de H, N y S Inicial y Final.**

Fuente: Elaboración propia.



**Gráfico 4.23. Comparativo de los promedios de C y O Inicial y Final.**

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO

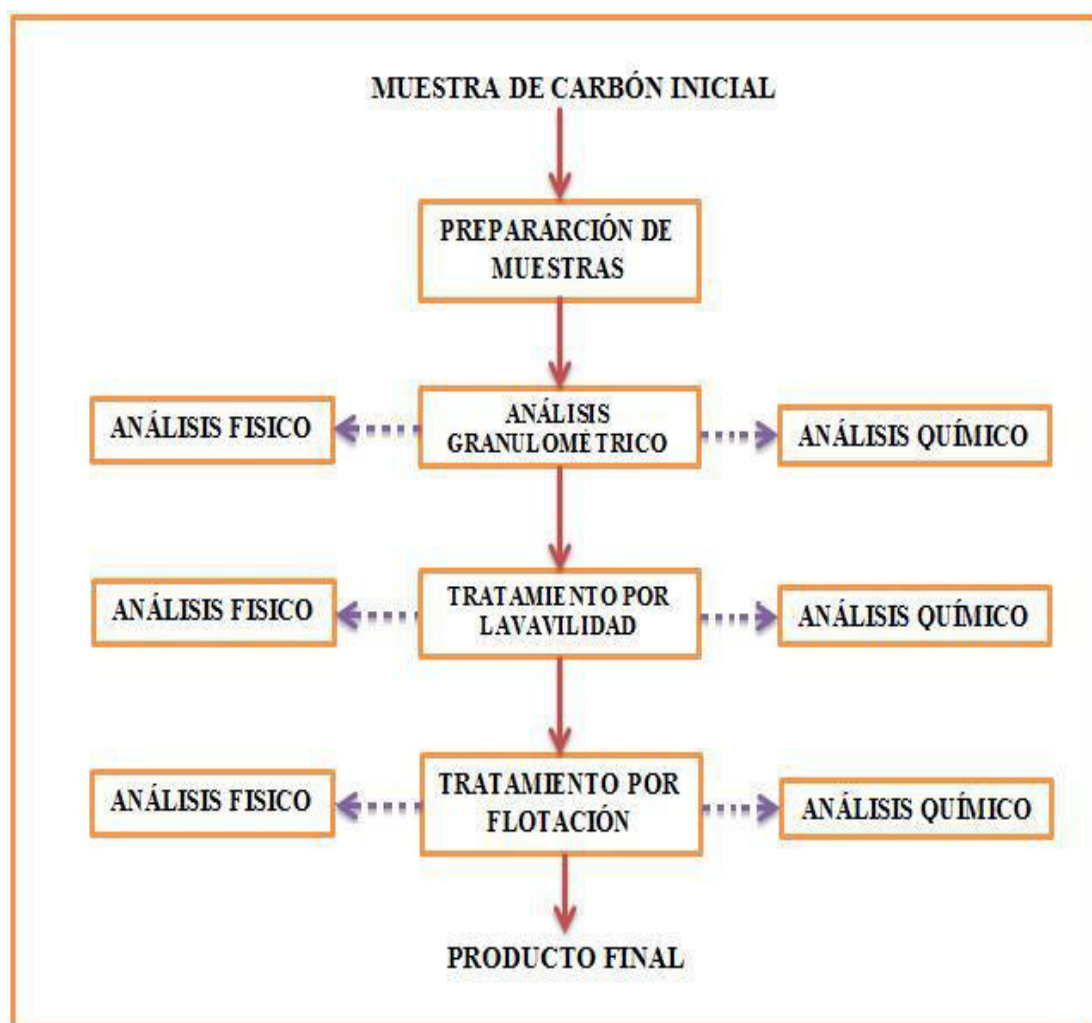


Gráfico 4.24. Diagrama de Flujo del Proceso Experimental.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5 PRUEBA DE HIPÓTESIS

##### 4.5.1 Hipótesis Estadística 1

##### 4.5.1.1 Hipótesis Nula ( $H_0$ )

La evaluación del carbón mineral no hará posible disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad.

##### 4.5.1.2 Hipótesis Alterna ( $H_A$ )

La evaluación del carbón mineral hará posible disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad.

#### 4.5.1.3 Elección de la Prueba

Nivel de significación:  $\alpha = 0,05$  (prueba bilateral)

Estadígrafo de Prueba: Prueba “t”

$$t = \frac{\overline{X}_1 - \overline{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$$

#### 4.5.1.4 Cálculos

Prueba de t para dos muestras suponiendo varianzas iguales.

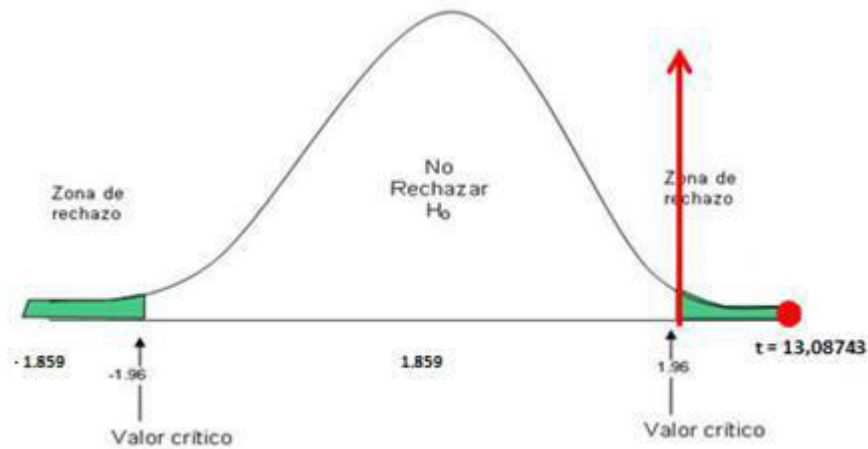
**Datos:**

| CARBON FIJO<br>INICIAL (CF <sub>INICIAL</sub> ) | CARBON FIJO<br>FINAL<br>(CF <sub>FINAL</sub> ) |
|---|--|
| 62,12   | 72,65  |
| 62,10   | 74,13  |
| 63,33   | 75,33  |
| 62,11   | 71,49  |
| 62,48   | 71,33  |

**Cálculos:**

| PRUEBA t                            | CF INICIAL | CF FINAL |
|-------------------------------------|------------|----------|
| Mediana                             | 62,428     | 72,986   |
| Varianza                            | 0,27997    | 2,97408  |
| Observaciones                       | 5          | 5        |
| Varianza agrupada                   | 1,627025   |          |
| Diferencia hipotética de las medias | 0          |          |
| Grados de Libertad                  | 8          |          |
| Estadístico t                       | 13,08743   |          |
| P(T>=t) una cola                    | 0          |          |
| Valor critico de t (una cola)       | 1,85954    |          |
| P(T<=t) dos colas                   | 0          |          |
| Valor critico de t (dos colas)      | 2,306      |          |

#### 4.5.1.5 Nivel y Regiones



**Gráfico 4.25. Nivel y Regiones de la Hipótesis 1.**

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.5.1.6 Toma de Decisiones

Como  $t = 13,08743$ , el valor “t” de la investigación cae fuera de la zona de aceptación, entonces se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_A$ ); es decir, la estadística inferencial nos permite comprobar estadísticamente la hipótesis.

#### 4.5.2 Hipótesis Estadística 2

##### 4.5.2.1 Hipótesis Nula ( $H_0$ )

La determinación optima del porcentaje de carbón fijo y el poder calorífico, no mejorará la calidad del carbón mineral.

##### 4.5.2.2 Hipótesis Alterna ( $H_A$ )

La determinación optima del porcentaje de carbón fijo y el poder calorífico, mejorará la calidad del carbón mineral.

##### 4.5.2.3 Elección de la Prueba

Nivel de significación:  $\alpha = 0,05$  (prueba bilateral)



Estadígrafo de Prueba: Prueba “t”

$$t = \frac{\overline{X}_1 - \overline{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$$

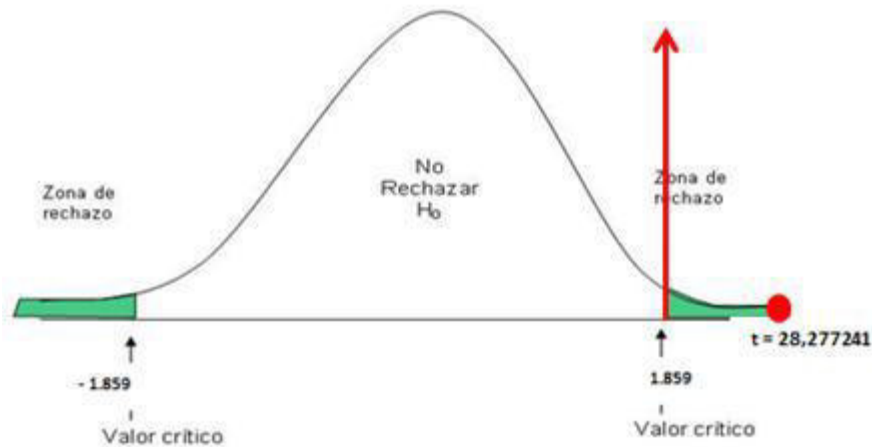
#### 4.5.2.4 Cálculos

Prueba de t para dos muestras suponiendo varianzas iguales.

| PODER CALORÍFICO INICIAL<br>(PC <sub>INICIAL</sub> ) | PODER CALORÍFICO FINAL<br>(PC <sub>FINAL</sub> ) |
|--|--|
| 7254,29  | 8172,10  |
| 7247,28  | 8047,11  |
| 7156,29  | 8191,29  |
| 7267,39  | 8142,64  |
| 7261,28  | 8152,96  |

| PRUEBA t                            | (PC <sub>INICIAL</sub> ) | (PC <sub>FINAL</sub> ) |
|-------------------------------------|--------------------------|------------------------|
| Mediana                             | 7237,906                 | 8141,22                |
| Varianza                            | 1988,10823               | 3114,27885             |
| Observaciones                       | 5                        | 5                      |
| Varianza agrupada                   | 2551,19354               |                        |
| Diferencia hipotética de las medias | 0                        |                        |
| Grados de Libertad                  | 8                        |                        |
| Estadístico t                       | 28,277241                |                        |
| P(T>=t) una cola                    | 0                        |                        |
| Valor crítico de t (una cola)       | 1,8595                   |                        |
| P(T<=t) dos colas                   | 0                        |                        |
| Valor crítico de t (dos colas)      | 2,306                    |                        |

#### 4.5.2.5 Nivel y Regiones



**Gráfico 4.26. Nivel y Regiones de la Hipótesis 2.**  
*Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.5.2.6 Toma de Decisiones

Como  $t = 28,277241$ , el valor “t” de la investigación cae fuera de la zona de aceptación, entonces se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_A$ ); es decir, la estadística inferencial nos permite comprobar estadísticamente la hipótesis.

#### 4.5.3 Hipótesis Estadística 3

##### 4.5.3.1 Hipótesis Nula ( $H_0$ )

El Proceso de flotación adecuado, no disminuirá el contenido de azufre y mejorará la calidad del carbón mineral.

##### 4.5.3.2 Hipótesis Alterna ( $H_A$ )

El Proceso de flotación adecuado, disminuirá el contenido de azufre y mejorará la calidad del carbón mineral.

##### 4.5.3.3 Elección de la Prueba

Nivel de significación:  $\alpha = 0,05$  (prueba bilateral)

Estadígrafo de Prueba: Prueba “t”

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$$

#### 4.5.3.4 Cálculos

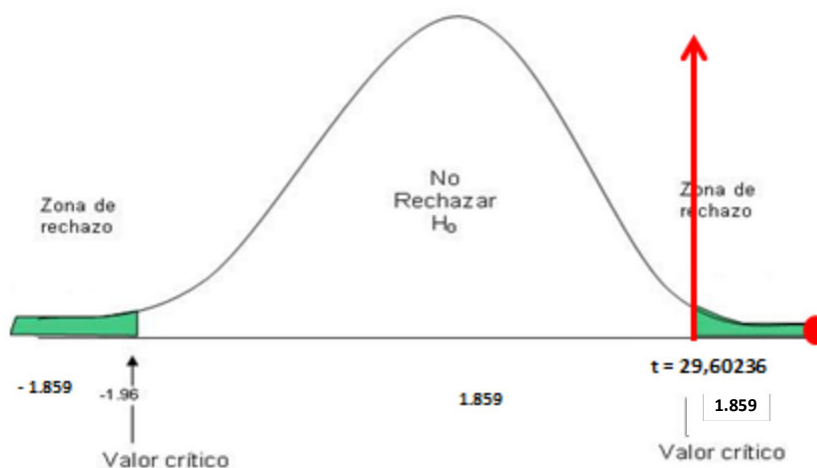
Prueba de t para dos muestras suponiendo varianzas iguales.

| AZUFRE INICIAL<br>(S <sub>INICIAL</sub> ) | AZUFRE FINAL<br>(S <sub>FINAL</sub> ) |
|---|---------------------------------------|
| 2,23                                      | 1,47                                  |
| 2,26                                      | 1,37                                  |
| 2,23                                      | 1,44                                  |
| 2,21                                      | 1,51                                  |
| 2,28                                      | 1,41                                  |

| PRUEBA t                            | (S <sub>INICIAL</sub> ) | (S <sub>FINAL</sub> ) |
|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Mediana                             | 2,242                   | 1,44                  |
| Varianza                            | 0,00077                 | 0,0029                |
| Observaciones                       | 5                       | 5                     |
| Varianza agrupada                   | 0,001835                |                       |
| Diferencia hipotética de las medias | 0                       |                       |
| Grados de Libertad                  | 8                       |                       |
| Estadístico t                       | 29,60236                |                       |
| P(T>=t) una cola                    | 0                       |                       |
| Valor critico de t (una cola)       | 1,8595                  |                       |
| P(T<=t) dos colas                   | 0                       |                       |
| Valor critico de t (dos colas)      | 2,306                   |                       |



#### 4.5.3.5 Nivel y Regiones



**Gráfico 4.27. Nivel y Regiones de la Hipótesis 3.**

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.5.3.6 Toma de Decisiones

Como  $t = 29,60236$ , el valor “t” de la investigación cae fuera de la zona de aceptación, entonces se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_A$ ); es decir, la estadística inferencial nos permite comprobar estadísticamente la hipótesis.

### 4.6 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

El análisis granulométrico promedio de las muestras iniciales de carbón presentan un % retenido acumulado de 93.51a -200 malla (Tabla 4.1), porcentaje alto debido a que el carbón es un material blando y presentan un alto índice de porosidad de acuerdo al promedio de los análisis físicos (tabla 4.2). El análisis inmediato muestra una humedad promedio de 0.78%, materia volátil de 18.73%, ceniza de 17.33 % y carbón fijo de 60.24% (Tabla 4.3); en cuanto al análisis elemental en base recibida se tiene 61.897% de Carbono, 2.214 % de Azufre y en base seca 62.85% de Carbono, 2.29 % de Azufre (Tabla 4.4) y un Poder Calorífico Superior en base recibida de 7243.59 Kcal/Kg en promedio y en base seca un Poder Calorífico Superior de 7257.31 Kcal/Kg en promedio (Tabla 4.5).

La caracterización mineralógica de la muestra de carbón ha arrojado la presencia de los siguientes minerales: Grafito (grf) y pirita (py), como se puede observar en los gráficos 2, 3, 4 y 5.

La distribución porcentual indica: grafito = 96,91% y pirita = 3,09%. Las partículas mayormente están libres, motivo por el cual de acuerdo al análisis modal, el grado de liberación tanto del grafito y pirita es de 100%; es decir todas las partículas contadas están libres.

El análisis microscópico confirma que el azufre se encuentra formando parte de la pirita y que el grado de liberación del grafito y pirita es 100%. Por las razones expuestas se realizó pruebas de separación por el proceso de flotación, a cada una de las muestras, incrementando el pH a 8, 9 y 10 y tiempos de 5, 7 y 9 minutos, para ello se realizó una serie de combinaciones en la que se han determinado 45 pruebas en total (Tabla 3.2); las pruebas de flotación se han realizado para deprimir la pirita y como el grafito es hidrofóbico se realizó una flotación bulk, utilizando como reactivo pequeñas cantidades de espumante(MIC) y colector.

Para el estudio de tratamiento con agua y por flotación, se han tomado los datos del análisis elemental de las muestras de carbón en base seca.

De los resultados del tratamiento con agua, el análisis granulométrico muestra que el 94.91% ha pasado la malla 200 (470.65 gr) en promedio (Tabla 4.6), porcentaje equivalente al carbón inicial debido a que los tiempos de agitación mecánica son cortos (5, 7 y 9 min.). El análisis inmediato refleja una considerable disminución de los porcentajes de Humedad de 0.78% a 0.63%, Cenizas de 17.33% a 16.44% y Azufre de 2.29% a 2.24% y una leve disminución de Materia Volátil de 18.73% a 18.65% y un leve incremento en el porcentaje de Carbón Fijo de 60.24% a 62.43% (Tabla 4.8 y gráficos del 4.7 al 4.11) los cuales favorecen en la mejora de la calidad del carbón mineral, considerando que en esta etapa se ha realizado el lavado del carbón mineral sólo con agua.

Para las pruebas de flotación, se usó una celda Denver donde fue colocada la pulpa formada por carbón y agua, en una relación de Líquido / Sólido de 3:2. La pulpa es acondicionada durante 5 minutos, tiempo en el cual se agregó el colector (diésel, 3g/Kg mineral) y el espumante (MIC, 0.6 g/Kg mineral). Luego se procedió a flotar en los tiempos y pH establecidos de acuerdo a las muestras codificadas. La espuma flotada, o concentrado fue recolectada, filtrada, secada y enviada para los análisis respectivos.

Dichos análisis se realizaron en un analizador de azufre total *Leco<sup>TM</sup>* Serie 3026 S-632, de acuerdo a la norma ASTM D-3177 (ASTM, 2008).

Los resultados se muestran en las tablas del 4.9 al 4.17, las que ilustran que en general para todas las etapas, el contenido de ceniza son menores que los del carbón alimentado a la celda de flotación, donde se observa una reducción de cenizas al aplicar la primera etapa de separación, sin embargo, una leve reducción de ceniza se obtuvo al aplicar la segunda y tercera etapa de separación en comparación con el contenido de ceniza de la muestra alimentada en la flotación 1. Esto probablemente se debe a que la liberación de materia mineral es alta al inicio de la flotación, quedando muy pocas partículas para las siguientes etapas a flotar.

Las mismas tablas muestran que las tres fracciones flotadas presentan un menor contenido de materia volátil y un mayor porcentaje de carbón fijo que el carbón alimentado, lo cual está en concordancia con la reducción de materia mineral y con la concentración de carbono elemental que presentan esas fracciones flotadas.

En la Tabla 4.18 se muestra el resumen de los promedios de las muestras flotadas, en donde se puede ver que a un pH de 10 y un tiempo de 7 minutos el proceso de flotación presenta las mejores condiciones; estos resultados corresponden a las muestras codificadas con el 105 (Tabla 3.2), sin embargo hay que tener en cuenta que al mismo pH (10) y en tiempos de 9 minutos no hay variaciones, lo que supone además que a mayores tiempos no habrá variaciones, y en tiempo de 5 minutos los valores son relativamente similares a tiempos de 7 y 9 minutos; las variaciones de los resultados en

estos rangos no difieren mucho por lo que también se consideran estos tiempos como aceptables.

Los resultados obtenidos del estudio comparativo de las muestras tratadas con agua y las muestras después de la flotación a pH 10 y a un tiempo de 7 minutos (Tabla 4.19 y los Gráfico 4.12 al 4.16) reflejan una leve disminución de Materia Volátil de 18.65% a 17.78%, una considerable disminución de Cenizas de 16.44% a 7.34%, un aumento muy importante de Carbón Fijo de 62.43% a 73.00% y de Poder Calorífico de 7257.31 Kcal/Kg de carbón a 8141.23 Kcal/Kg de carbón y se ha logrado disminuir el contenido de azufre de 2.24% a 1.42% con lo cual el carbón puede utilizarse para los procesos pirometalúrgicos.

Los resultados de la Tabla 4.20 y gráficos del 4.17 al 4.21 detallan la comparación de las muestras iniciales y las muestras finales (Flotación) a un pH 10 y tiempo de 7 minutos, así como el promedio de los análisis inmediato y elementales del carbón mineral; donde se ilustra que en general las muestras de Materia Volátil disminuyen levemente de 18.73% a 17.78% en promedio, el contenido de ceniza son considerablemente menores que los del carbón inicial, de 17.33% a 7.34%; un incremento promedio considerable de carbón fijo de 60.24% hasta 72.99% en promedio y una disminución considerable de Azufre de 2.29% a 1.42% en promedio.

Por otro lado, de los resultados del análisis químico elemental (Tabla 4.21, gráficos 4.22 y 4.23) del tratamiento por Flotación comparados con las muestras iniciales (tabla 4.22) presentaron diferencias en su análisis elemental.

Las fracciones flotadas mostraron incremento en los contenidos de carbono (62.85% a 71.57%), hidrógeno (4.42% a 4.76%), nitrógeno (0.72% a 0.77%) y oxígeno (24.85% a 29.71%) en comparación con el carbón inicial. Los mayores contenidos de carbono e hidrógeno están de acuerdo con los incrementos de materia volátil y carbón fijo encontrados en el análisis proximal. En relación con el azufre, se observó que ocurrió una reducción de su concentración en las fracciones flotadas comparativamente

con el carbón alimento, de 2.29 a 1.44 en promedio, lo cual significa que existe alta presencia de azufre pirítico en el carbón original.

A pesar de que se presentó reducción en los contenidos de ceniza y materia volátil en las fracciones flotadas, los resultados anteriores muestran que usando el proceso de flotación burbujeante es efectivo para obtener carbones para reducir los contenidos de azufre y reducir los contenidos de ceniza e incrementar el poder calorífico del carbón mineral.

De los resultados de las hipótesis se tiene que, la Hipótesis nula ( $H_0$ ): La evaluación del carbón mineral no hará posible disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad. Como  $t = 13,08743$  (Gráfico 4.24), el valor “t” de la investigación cae fuera de la zona de aceptación, entonces se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_A$ ): La evaluación del carbón mineral hará posible disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad.

Hipótesis nula ( $H_0$ ): La determinación óptima del porcentaje de carbón fijo y el poder calorífico, no mejorará la calidad del carbón mineral. Como  $t = 28,277241$  (Gráfico 4.25), el valor “t” de la investigación cae fuera de la zona de aceptación, entonces se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_A$ ): La determinación óptima del porcentaje de carbón fijo y el poder calorífico, mejorará la calidad del carbón mineral.

Hipótesis nula ( $H_0$ ): El Proceso de flotación adecuado, no disminuirá el contenido de azufre y mejorará la calidad del carbón mineral. Como  $t = 29,60236$  (Gráfico 4.26), el valor “t” de la investigación cae fuera de la zona de aceptación, entonces se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_A$ ): El Proceso de flotación adecuado, disminuirá el contenido de azufre y mejorará la calidad del carbón mineral.

## CONCLUSIONES

1. El carbón es un compuesto orgánico de gran utilidad para la generación de energía eléctrica y la fabricación de acero a partir de minerales de hierro. Sin embargo, es un compuesto que contiene impurezas, como el azufre, que desde el punto de vista ambiental y económico es necesario reducir.
2. Del estudio de Caracterización se tiene que el carbón mineral contiene:
  - Grafito : 96.91 %
  - Pirita : 3.09 %
  - Granulometría : 93.51% -200 Mallas
  - Poder Calorífico : 7257.31 Kcal/Kg.
  - Materia Volátil : 18.73%
  - Ceniza : 17.33%
  - Carbono : 62.85%
  - Hidrógeno : 4.42%
  - Nitrógeno : 0.72%
  - Azufre : 2.29%
  - Oxígeno : 24.85%
3. De las pruebas de lavabilidad con agua se determinó que:
  - Se disminuye el 2.18% del contenido de azufre (2.29% a 2.24% en promedio).
  - Se incrementa en 4.03% el contenido de Carbón Fijo (60.24% a 62.43% en promedio).

- Se disminuye en 5.14% el contenido de Cenizas (17.33% a 16.44% en promedio).
4. De las pruebas de flotación se determinó que:
- Se disminuye el 36.61% de contenido de Azufre (De 2.24 a 1.42% en promedio)
  - Se incrementó el Contenido de Carbón Fijo en 16.91% (De 62.43 a 72.99% en promedio).
  - Se disminuye el contenido de cenizas en un 55.35% (De 16.44 a 7.34% en promedio).
  - Aumenta el poder calorífico en 12.18% (De 7257.31 a 8141.23 Kcal/Kg en promedio).
5. De la evaluación realizada al Carbón Mineral tratado después del tratamiento por Lavabilidad y Flotación (Proceso completo) se determina que:
- El contenido de azufre disminuye en 37.99% (2.29 inicial a 1.42 final)
  - El Poder Calorífico aumenta en 12.18% (De 7257.31 a 8141.23 Kcal/Kg en promedio).

Resultados muy satisfactorios para los procesos metalúrgicos y que hacen factible el uso de carbón para la industria.

6. Las condiciones óptimas en el proceso de flotación son:

Granulometría : 93%-200M.

pH Flotación : 10

Densidad de pulpa : 1040 gr/lit.

Tiempo de acondicionamiento : 5 min.

Tiempo de flotación óptima : 7 min.

Consumo de espumante : 2 gotas de aceite de pino.

## **RECOMENDACIONES**

1. Realizar las evaluaciones de Carbón Mineral de otras zonas, y realizar pruebas similares, con la finalidad de determinar las condiciones óptimas del procedimiento de lavabilidad y flotación.
2. Organizar el sector productivo de carbón convocando a empresarios, transportistas, comercializadores, autoridades y representantes en general de la región, para generar consenso y convicción sobre la conveniencia de operar asociadamente.
3. Dar mayor valor agregado al carbón mineral en bruto para conseguir un mejor precio para el carbón procesado, mediante la aplicación de operaciones de lavado y clasificación granulométrica.
4. Establecer una cadena de carbón mineral que comprenda las etapas de extracción minera, pre tratamiento de carbón, transporte, almacenamiento, tratamiento como fases intermedias entre el inicio y el fin de la cadena que comprende a los proveedores y clientes; además de la implementación de un sistema que permita administrar la información de las operaciones de cada uno de los agentes que intervienen en la cadena.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Aramburú, V., Núñez, P. y otros** (2007). “*Disminución del contenido de azufre en carbón mineral, mediante procesos metalúrgicos para uso industrial*”. Revista del Instituto de Investigaciones de la FIGMMG. Volumen 10, N° 20, 7-12. UNMSM. Lima.
2. **Barraza, J., Díaz, A. y Write, Á.** (1998). “*Beneficio de los carbones de las industrias y las carboeléctricas del valle del Cauca y Cauca*”. En Memorias IV Congreso Nacional y II Internacional en Ciencia y Tecnología del Carbón. Paipa (Boyacá), p. 147 – 160. Colombia.
3. **Barrientos, J.** (2009). “*Guía de Prácticas para Observación en el Microscopio Electrónico en el Laboratorio de Metalografía*”. Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
4. **Baruah y Khare.** (2010). “*Estudio comparativo de diversos tratamientos para la remoción de azufre en carbón mineral*”. Revista GEOMIMET. No. 287, pág. 06. Lima.
5. **CFI/Grupo del Banco Mundial.** (2007). “*Environmental, Health and Safety Guidelines for Mining*”.  
[http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/AttachmentsByTitle/gui\\_EHSGuidelines2007\\_Mining/\\$FILE/Final+-+Mining.pdf](http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/AttachmentsByTitle/gui_EHSGuidelines2007_Mining/$FILE/Final+-+Mining.pdf)
6. **Cortes, V.** “*Carbón*”. [www.factoria3.com/documentos/CARBON.pdf](http://www.factoria3.com/documentos/CARBON.pdf)

7. **Fernández, J.** (1996). *“Depuración de vertidos a cauces públicos de los lavaderos de carbón de Hunosa”*. Madrid.
8. **Giraldo, M., Blas, W.** (2007). *“Minería actual del carbón en el norte del Perú”*. Revista del Instituto de Investigaciones de la FIGMMG. Volumen 10, N° 20, 76-81. UNMSM. Lima.
9. **Geer, M. y Yancey H.** (1985). *“Evaluation of washery performance, U.S. Bureau of Mines”*. Report of investigation 8093.
10. **Gómez, J.** (1996). *“Eliminación de azufre y elementos traza de carbones de alto rango mediante métodos físicos de depuración”*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo. España.
11. **Guardadog, M., Rodríguez, J. y Monge, L.** (2010). *“Evaluación de la Calidad del Carbón Vegetal Producido en Hornos de Retorta y Hornos Metálicos Portátiles en el Salvador”*. Antiguo Cuscatlán, El Salvador, C.A. Octubre.
12. **INGEMMET.** (1996). *“Carbón en el Perú”*. Lima. <[www.ingemmet.gob.pe](http://www.ingemmet.gob.pe)>.
13. **INGEMMET.** (2003). *“Inventario preliminar del carbón mineral en el Perú”*. Lima.
14. **Inusta, J.** (2004). *“El carbón”*. El Mundo. Madrid.  
<<http://aula.elmundo.es/aula/lamina1075976702.pdf>>
15. **INSTITUTO MUNDIAL DEL CARBÓN.** *“El carbón como recurso: una visión general del carbón”* Una publicación en Español del World Coal Institute, PDF 4.5 Mb. correo electrónico: [info@worldcoal.org](mailto:info@worldcoal.org) / [www.worldcoal.org](http://www.worldcoal.org)

16. **Kawatra, S. y Eisele, T.** (1998). *“Studies relating to removal of pyritic sulphur from coal by column flotation, in column”*. Ed. K.V.S. Sastry, SME. Littleton.
17. **Klassen, V. y Mokrousov, V.** (1963). *“An Introduction to the Theory of Flotation”*. Butterworth.
18. **Leja, J.** (1983). *“Surface Chemistry of Froth Flotation”*. University of Columbia, Plenum Press.
19. **León, E.** (2006). *“Importancia del carbón mineral en el desarrollo”*. Revista del Instituto de Investigaciones de la FIGMMG. Volumen 9, N° 18, 91-97. UNMSM. Lima.
20. **Maradonne, C. y Killmeyer, R.** (1988). *“Fine coal beneficiation via heavy-liquid cycloning”*.
21. **Manrique, A.** (1986). *“Geología económica de las cuencas del Alto Chicama, Santa, Oyón y Yatunhuasi”*. PROCARBON. Lima.
22. **Maxera, C.** (2011). *“Aplicación de la simulación para la optimización del acarreo de mineral”*. Tesis digitales, UNMSM. Lima.
23. **Menéndez, J.** (2012). *“El carbón en la vida cotidiana”*. Instituto Nacional del Carbón. España.
24. **MINEM, Perú.** (2003). *“Reserva carbonífera de la Región Ancash”*. Lima.  
<[www.minem.gob.pe/archivos/dgm/mapas/sig/car\\_res/maps/02\\_ancash.pdf](http://www.minem.gob.pe/archivos/dgm/mapas/sig/car_res/maps/02_ancash.pdf)>.
25. **MINEM, Perú.** (2003). *“Reserva carbonífera de la región Cajamarca”*. Lima.  
[www.minem.gob.pe/archivos/dgm/mapas/sig/car\\_res/maps/06\\_cajamarca.pdf](http://www.minem.gob.pe/archivos/dgm/mapas/sig/car_res/maps/06_cajamarca.pdf).

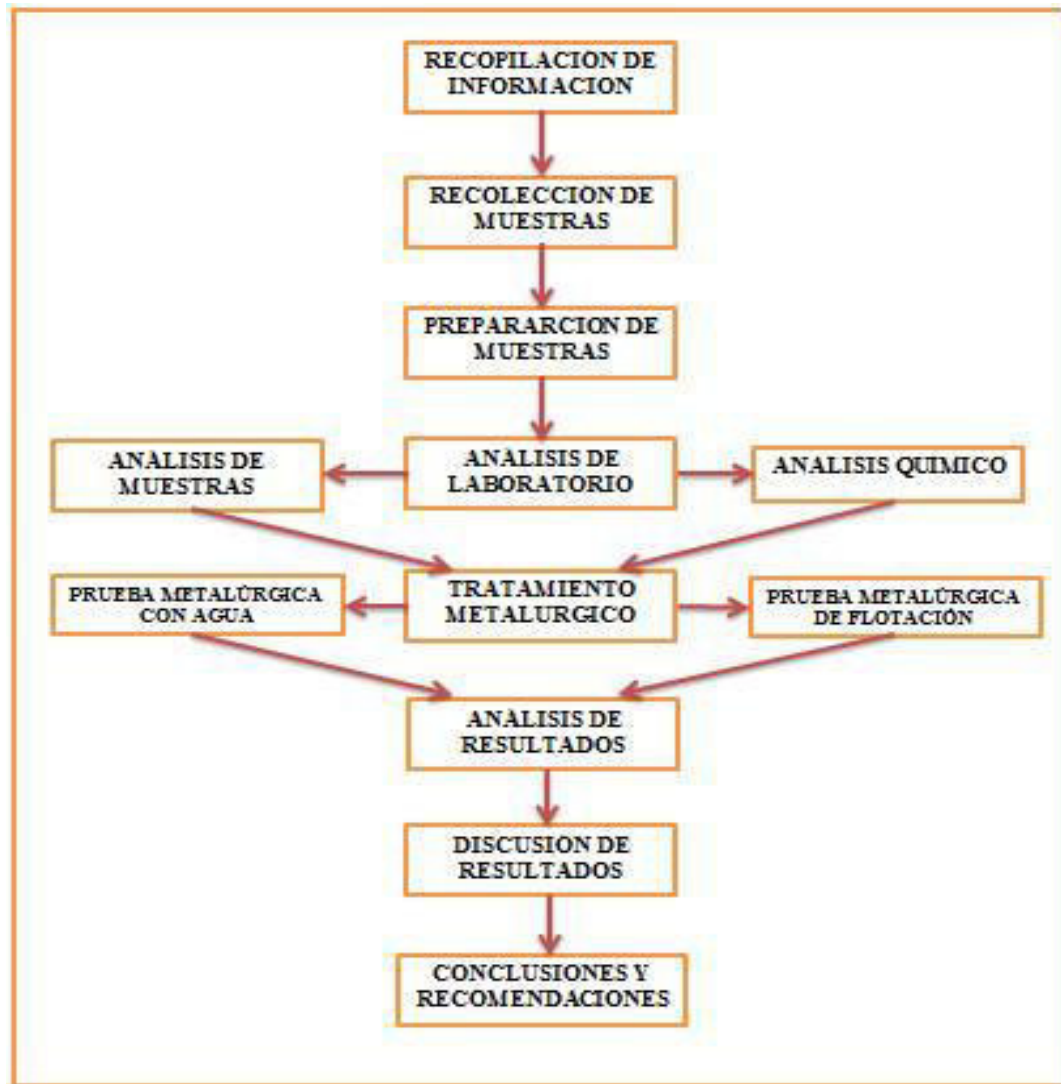
26. **MINEM, Perú.** (2003). "*Reserva carbonífera de la región La Libertad*". Lima.  
<[www.minem.gob.pe/archivos/dgm/mapas/sig/car\\_res/maps/13\\_la\\_libertad.pdf](http://www.minem.gob.pe/archivos/dgm/mapas/sig/car_res/maps/13_la_libertad.pdf)>.
27. **MINEM, Perú.** (2003). "*Reserva carbonífera de la región Lima*". Lima.  
<[www.minem.gob.pe/archivos/dgm/mapas/sig/car\\_res/maps/15\\_lima.pdf](http://www.minem.gob.pe/archivos/dgm/mapas/sig/car_res/maps/15_lima.pdf)>.
28. **MINEM, Perú.** (2003). "*Mapa de reservas carboníferas*". Lima.  
<[http://www.minem.gob.pe/archivos/dgm/mapas/sig/carres/mask/01\\_peru\\_ca\\_2003.pdf](http://www.minem.gob.pe/archivos/dgm/mapas/sig/carres/mask/01_peru_ca_2003.pdf)>.
29. **Osorio, A.** (1991). "*Estudio General del Carbón Mineral en el Perú*". Lima.
30. **Prieto, I.** (1989). "*Análisis de los parámetros de operación de la combustión del carbón que intervienen en la reducción de las emisiones de dióxido de azufre*". Universidad Politécnica de Madrid. España.
31. **Rojas, M.** (2008). "*Perspectivas de procesamiento y uso del carbón mineral peruano*". ISSN 1025-9929, pp. 232. Perú.
32. **Santiago, C.** "*Química elemental moderna: Inorgánica*" Pág. 213.
33. **Seitz, R. y Kawatra, S.** (1987). "*Fundamentals of fine coal processing*". Paper N° 8 – 7, SME Annual Meeting, Denver, Colorado.
34. **Vargas, M. y Ramón, J.** (2007). "*Biodesulfuración de Carbón: Una Alternativa Ambientalmente Viable en la Reducción de Azufre del Carbón*". Revista Ambiental: Agua, Aire y Suelo, ISSN1900-9178Volumen2Número2. España.
35. **Zegarra, S.** (1986). "*Técnica de Mezcla de Carbón para la Elaboración de Coque Metalúrgico*". Lima.

## **ANEXOS**

**Anexo 1. Matriz de consistencia.**

| <b>Título: EVALUACIÓN DEL CARBÓN MINERAL, PARA DISMINUIR EL CONTENIDO DE AZUFRE Y MEJORAR SU CALIDAD</b>                 |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|
| <b>PROBLEMA GENERAL</b>  | <b>OBJETIVO GENERAL</b>   | <b>H I P Ó T E S I S</b>  |   |   |
|  |   | <b>HIPÓTESIS GENERAL</b>  | <b>VARIABLES DE LA HIPÓTESIS</b>  |   |
|  |   |   | <b>IDENTIFICACIÓN</b>   | <b>TECNICAS DE RECOLECCIÓN</b>  |
| ¿De qué manera la evaluación del carbón mineral, puede disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad?            | Evaluar el carbón mineral para disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad.                             | La evaluación del carbón mineral, hará posible disminuir el contenido de azufre y mejorar la calidad.                           | <b>Variable Independiente:</b><br>% de azufre presente en el carbón mineral                           | <b>Muestreo y análisis</b><br>Muestreo, análisis, pruebas metalúrgicas. |
|  |   |   | <b>Variable Dependiente:</b><br>Calidad del carbón mineral  | <b>-Pruebas metalúrgicas</b><br>Análisis del carbón mineral             |
| <b>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</b>   | <b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>  | <b>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</b>  | <b>VARIABLES DE LA HIPÓTESIS</b>  |   |
| <b>Problema Específico N° 1</b>  | <b>Objetivo Específico N° 1</b>   | <b>Hipótesis N° 1</b>   | <b>IDENTIFICACIÓN</b>   | <b>TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN</b>  |
| ¿Es posible caracterizar el carbón mineral mediante los análisis fisicoquímicos, petrográficos, mineralógico y mecánico? | Caracterizar el carbón mineral, mediante los análisis físicos, químicos, petrográfico mineralógico y mecánico.    | Los análisis fisicoquímicos, petrográficos, mineralógicos y mecánicos, permiten evaluar las características del carbón mineral. | <b>Variable Independiente:</b><br>Análisis físico químicos, petrográficos, mineralógicos y mecánicos. | <b>Pruebas metalúrgicas a nivel de laboratorio</b>                      |
|  |   |   | <b>Variable Dependiente:</b><br>Caracterización del carbón mineral.                                   | <b>Análisis de laboratorio</b>  |
| <b>Problema Específico N° 2</b>  | <b>Objetivo Específico N° 2</b>   | <b>Hipótesis N° 2</b>   | <b>IDENTIFICACIÓN</b>   | <b>TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN</b>  |
| ¿Influye la cantidad de carbón fijo y el poder calorífico en la calidad del carbón mineral?                              | Determinar el porcentaje de carbón fijo y el poder calorífico del carbón mineral.                                 | La determinación optima del porcentaje de carbón fijo y el poder calorífico, mejorará la calidad del carbón mineral.            | <b>Variable Independiente</b><br>% de Calor fijo<br>Poder calorífico                                  | <b>Pruebas metalúrgicas a nivel de laboratorio</b>                      |
|  |   |   | <b>Variable Dependiente</b><br>Calidad del carbón mineral.  | <b>Análisis de laboratorio</b>  |
| <b>Problema Específico N° 3</b>  | <b>Objetivo Específico N° 3</b>   | <b>Hipótesis N° 3</b>   | <b>IDENTIFICACIÓN</b>   | <b>TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN</b>  |
| ¿El proceso de flotación puede disminuir el contenido de azufre y mejorar la calidad del carbón mineral?                 | Realizar el proceso de flotación, para disminuir el porcentaje de azufre y mejorar la calidad del carbón mineral. | El proceso de flotación adecuado, disminuye el contenido de azufre y mejora la calidad del carbón mineral.                      | <b>Variable Independiente</b><br>Proceso de flotación<br>(% de extracción de azufre)                  | <b>Pruebas metalúrgicas</b>   |
|  |   |   | <b>Variable Dependiente</b><br>Calidad del carbón   | <b>Análisis de laboratorio</b><br>Análisis del carbón mineral           |

**Anexo 2. Diagrama metodológico de la investigación realizada del carbón mineral.**



*Fuente:* Elaboración propia.

### *Anexo 3. Métodos analíticos.*

## **1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

### **1.1 EQUIPOS Y MATERIALES**

- Tamices (ASTM) # 4, # 10, # 18 y #50 de la serie de Tyler.
- Balanza mecánica “A. VANDONI”, tipo B, con capacidad de 5 Kg.
- Trituradora de mandíbulas “DENVER” del tipo “HA”.
- Molino de rodillos “DENVER” del tipo “DA”.

### **1.2 PROCEDIMIENTO**

- Pesaje: Se obtiene el peso en bruto de las muestras, (estéril y mineral), para conocer la cantidad de material con que se empieza el proceso.
- Clasificación Manual: Mediante un proceso de selección visual se separa la fracción mineral de la estéril (pallaqueo), luego se procede a pesar cada fracción.
- Homogenización y Cuarteo: La homogenización se realiza en forma manual y el cuarto se realiza con un cuarteador tipo Jones de 12 aberturas.
- Trituración: se utiliza una chancadora para reducir el tamaño de las muestras a un tamaño promedio de 2 a 3 cm.
- Molienda: Utilizando el molino de rodillos “DENVER” del tipo “DA” la muestra es sometida a conminución, hasta obtener un d80 de 3 mm.
- Análisis Granulométrico: La muestra de carbón mineral son colocadas en los tamices y sometidas a movimiento por medio del equipo “RO TAP”, modelo “B”. por espacio de 8 a 10 minutos aproximadamente. Luego se pesa el carbón mineral que se encuentra en cada tamiz y se realizan los cálculos respectivos.

### **1.3 CÁLCULOS REALIZADOS**

- % Retenido =  $\text{Peso Retenido} / \text{Total Retenido} * 100$ .
- % Retenido Acumulado = % Retenido 1 + % Retenido 2.
- % Retenido =  $100 - \% \text{ Retenido Acumulado}$ .

## **2 DENSIDAD REAL**

### **2.1 MATERIALES**

- Matraz de 50 ml.
- Balanza analítica.
- Espátula de metal.
- Frasco lavador.

### **2.2 REACTIVOS**

- Agua destilada.
- Muestra de carbón mineral.

### **2.3 PROCEDIMIENTO**

- Pesar el matraz en vacío.
- Agregar 50 gr. de carbón mineral al matraz y pesar nuevamente.



- Aforar el matraz con agua destilada, cuidando que no exista burbujas de aire.
- Pesar nuevamente el matraz.
- Realizar los cálculos correspondientes.

## 2.4 CÁLCULOS

Dónde:

P = Peso de la muestra del carbón mineral en gramos.

V<sub>1</sub> = Volúmen del matraz en ml.

P<sub>1</sub> = Peso del matraz con la muestra de carbón mineral y agua en gr.

P<sub>2</sub> = Peso del matraz con la muestra de carbón mineral en gramos.

El peso específico se expresa en g/ml o Kg/l.

## 3 DENSIDAD APARENTE

### 3.1 MATERIALES

- Probeta de 50 ml.
- Balanza analítica.

### 3.2 REACTIVOS

- Muestra de carbón mineral.
- Agua.

### 3.3 PROCEDIMIENTO

- Pesar 50 gr. de muestra de carbón mineral.
- Colocar 30 ml. de agua en la probeta y añadir la muestra de carbón mineral.
- Observar y anotar el nuevo volumen.
- Realizar los cálculos respectivos.

### 3.4 CÁLCULOS

Dónde:

M = Peso de la muestra de carbón mineral en gr.

V<sub>D</sub> = V<sub>2</sub> - V<sub>1</sub>

V<sub>1</sub> = Volumen inicial en ml.

V<sub>2</sub> = Volumen final en ml.

Los resultados se expresan en Kg/l.

## 4 POROSIDAD

### 4.1 MATERIALES Y REACTIVOS

Son los mismos que se utilizan en la determinación de las densidades real y aparente del carbón mineral.

#### **4.2 PROCEDIMIENTO**

Se toma como base los valores obtenidos en la densidad real y aparente.

#### **4.3 CÁLCULOS**

---

Dónde:

$D_R$  = Densidad Real en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .

$D_{AP}$  = Densidad Aparente en  $\text{Gr}/\text{cm}^3$ .  
= Porosidad en %.

### **5 ANÁLISIS DE HUMEDAD (H)**

#### **5.1 EQUIPOS**

- Horno de secado ( $105^\circ\text{C}$ ).
- Desecador de vidrio.
- Recipientes para muestras con tapa.
- Balanza graduada (a 0.1 gr.).

#### **5.2 PROCEDIMIENTO**

- Se calienta el horno a  $105^\circ\text{C}$  para remover los elementos volátiles y líquidos.
- Se divide la muestra de 50 a 100 gramos.
- La muestra se coloca en el recipiente previamente pesado y numerado, y se cubre inmediatamente.
- Se saca y botan previamente los materiales inorgánicos (plásticos, vidrio, goma, metales) y otros que no absorban humedad.
- Secar el material a peso constante.
- Colocar la muestra en el horno con el recipiente destapado durante 48 horas.
- Enfriar la muestra sobre una superficie seca o un desecador de vidrio.
- Pesar las muestras.

#### **5.3 CÁLCULOS**

---

### **6 ANÁLISIS DE MATERIA VOLATIL (MV)**

#### **6.1 EQUIPOS**

- Horno de secado.
- Balanza analítica.
- Desecador de vidrio.
- Crisoles de porcelana.
- Horno de mufla con pirómetro indicador y control de temperatura por reóstato, para alcanzar temperaturas de  $650^\circ\text{C}$ .

## **6.2 PROCEDIMIENTO**

- Pesar 5 gramos de muestra secados y molidos en un crisol previamente incinerado y tratado ( $W_1$ ).
- Secar la muestra en en crisol a  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  en el horno de secado durante dos horas.
- Sacar el crisol del horno y dejar enfriar en el frasco secador.
- Pesar el crisol ( $W_2$ ) y determinar el peso neto seco de la muestra ( $W_2 - W_1$ ).
- Colocar el crisol en el horno de mufla, frío y luego aumentar la temperatura del horno gradualmente hasta los  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  , mantener esta temperatura durante dos horas.
- Sacar el crisol del horno y dejar enfriar en el frasco secador.
- Pesar el crisol ( $W_3$ ) y por diferencia determinar el peso de la materia volátil ( $W_3 - W_1$ ).

## **6.3 CÁLCULOS**

---

# **7 ANÁLISIS DE CENIZAS (CZ)**

## **7.1 EQUIPOS**

- Horno de secado
- Balanza analítica
- Desecador de vidrio
- Crisoles de porcelana
- Horno de mufla con pirómetro indicador y control de temperatura por reóstato, para alcanzar temperaturas de  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## **7.2 PROCEDIMIENTO**

- Pesar 5 gramos de muestra secados y molidos, y vaciarlos en un crisol previamente incinerado y tratado ( $W_1$ ).
- Volver a secar la muestra en el crisol a  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  en el horno de secado durante dos horas.
- Sacar el crisol del horno y dejar enfriar en el frasco secador.
- Pesar el crisol ( $W_2$ ) y determinar el peso neto seco de la muestra ( $W_2 - W_1$ ).
- En el horno de mufla frío, colocar el crisol y aumentar la temperatura del horno gradualmente hasta  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mantener esta temperatura por dos horas.
- Sacar el crisol del horno y dejar enfriar en el frasco lavador.
- Pesar el crisol ( $W_3$ ) y determinar el peso de la ceniza por diferencia de pesos ( $W_3 - W_1$ ).

## **7.3 CÁLCULOS**

---

## **8 ANÁLISIS DE CARBÓN FIJO (CF)**

### **8.1 PROCEDIMIENTO**

La diferencia del 100% de los análisis de humedad, ceniza y materia volátil nos da el Carbón Fijo.

### **8.2 CÁLCULOS**

Dónde:

CF = Carbón Fijo

H = Humedad

CZ = Cenizas

MV = Materia Volátil

## **9 ANÁLISIS PARA DETERMINACIÓN DE AZUFRE**

### **9.1 EQUIPOS**

- Placa caliente u otra fuente de calor.
- Crisoles de porcelana.
- Mufla de 600 °C.
- Mufla de 900 °C.
- Horno de secado.
- Desecador de vidrio.
- Balanza analítica.
- Vasos de precipitados (250 y 400 ml).
- Papel filtro Whatman N° 40 y 42.
- Vidrios reloj estriados.
- Pipetas volumétricas

### **9.2 REACTIVOS**

- Agua destilada.
- Indicador naranja de metilo (1 ml. de solución saturada de naranja de metilo por litro de agua destilada).
- Hidróxido de amonio concentrado.
- Ácido clorhídrico concentrado.
- Solución de agua bromurada concentrada.
- Solución de cloruro de bario al 10%.

### **9.3 PROCEDIMIENTO**

- Recoger el lavado de la bomba, que sigue a la combustión de la muestra (prueba de poder calorífico) que no pese más de 1 gramo. Se debe lavar hasta que no se observe reacción ácida adicional y asegurarse que se agregue todo el precipitado al vaso que recoge el lavado.
- Titular el lavado con una solución estándar de carbonato de sodio (0.0725 N) para determinar la reacción ácida.

- Después de la neutralización, agregar un mililitro de hidróxido de amonio ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) y calentar la solución hasta hervir, seguidamente se filtra con el papel Whatman N° 41 dentro de un vaso precipitado de 400 a 600 °C.
- Lavar el papel filtro con agua caliente, para retirar los residuos.
- Agregar agua suficiente al vaso de precipitado de modo que el volumen total de la solución sea aproximadamente 250 ml.
- Neutralizar la solución con HCl concentrado y añadir 2 ml. de exceso.
- Agregar 10 ml. de agua bromurada saturada.
- Sobre una placa caliente u otra fuente de calor, evaporar aproximadamente 200 ml. de la solución.
- Agregar lentamente a la solución 10 ml. de cloruro de bario al 10 %, mientras se agita por dos minutos.
- Tapar el vaso de precipitado con un vidrio – reloj estriado y reducir el volumen a 75 ml. con una placa caliente.
- Dejar sedimentar y enfriar el precipitado. (el enfriamiento y sedimentación puede durar de 1 a 12 horas dependiendo de la muestra analizada).
- Filtrar el precipitado a través del papel filtro N° 42.
- Lavar el papel filtro con agua destilada caliente hasta asegurarse que esté libre de cloruros.
- Transferir el papel filtro conteniendo el precipitado a un crisol previamente secado y pesado.
- Secar y carbonizar el papel filtro a baja temperatura sin que arda.
- Poner el crisol en la mufla y elevar la temperatura a 600 °C. Mantener la temperatura por dos horas.
- Enfriar en un desecador de vidrio hasta alcanzar la temperatura ambiente.
- Pesar de nuevo el crisol.

## 9.4 CÁLCULOS

## 10 PODER CALORÍFICO

### 10.1 EQUIPOS

- Calorímetro de bomba de oxígeno
- Conexión para el relleno de oxígeno.
- Cilindro de oxígeno.
- Regulador de presión.
- Balanza con capacidad neta de peso hasta 5 Kg.
- Horno de secado.
- Frasco secador.
- Balanza analítica.

### 10.2 REACTIVOS

- Agua destilada.
- Solución de carbonato de sodio 0,0725 N.

- Indicador de naranja de metilo o rojo de metilo.

### 10.3 PROCEDIMIENTO

- Cumplir al detalle las instrucciones del fabricante del calorímetro.
- Pesar entre 0,8 y 1,2 gr. de la muestra previamente molida y resecada directamente en la cápsula metálica de combustión.
- Instalar el alambre fusible entre dos electrodos de la bomba de oxígeno y poner la capsula en el soporte de la abrazadera de uno de los electrodos y colocar una cantidad determinada de agua destilada (1 ml) en la bomba.
- Colocar la cabeza de la bomba dentro del cilindro y se atornilla la tapa firmemente con la mano mediante una argolla de contacto.
- Conectar la válvula de entrada de oxígeno al cilindro que contiene este gas y se deja penetrar lentamente el oxígeno hasta llegar a una presión de 30 atm. Luego se cierra la válvula de entrada de oxígeno y se desconecta la bomba.
- Se llena el balde del calorímetro con 2000 ml. de agua destilada para que la bomba quede sumergida en ella y completamente cubierta. La temperatura del agua debe estar aproximadamente a 1,5 °C en relación a la temperatura ambiente.
- Sumergir la bomba en el balde y conectar los bornes de los electrodos con el circuito de ignición y colocar la tapa con el termómetro y el agitador.
- Poner el agitador en marcha durante cinco minutos y luego empezar las lecturas de la temperatura cada 60 segundos. Anotar las lecturas con aproximación de una milésima durante otros cinco minutos por lo menos.
- Cerrar el circuito de ignición y anotar la temperatura al momento de ignición, al final de este período preliminar.
- Anotar las lecturas de la temperatura a los 45, 60, 75, 90, 105 segundos después de producido el encendido y luego a intervalos de un minuto, hasta que se haya llegado al valor máximo de la temperatura.
- Seguir anotando las temperaturas, ahora decrecientes, durante otros cinco minutos.
- Detener el motor una vez anotada la última lectura y se remueve la tapa, se desconecte los bornes de ignición y se retire la bomba del calorímetro.
- Después de cinco minutos dejar escapar lentamente los gases abriendo la válvula de salida. Se destornilla la tapa de la bomba y se revisa cuidadosamente para cerciorarse de que no queden partículas de combustibles sin quemar. En caso de haberlas se descarta el ensayo.
- Lavar bien el interior de la bomba, inclusive la tapa de la válvula y la cápsula con un chorro de agua destilada y verter el lavado en un vaso de precipitación. Hacer la titulación del lavado usando la solución de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  0,0725N y el indicador naranja de metilo. Conservar la solución que queda después de la titulación a fin de usarla en la prueba de azufre.
- Remover cuidadosamente los excesos del alambre fusible no quemados y se mide.
- Hacer la prueba de azufre conforme al manual del fabricante del calorímetro.

### 10.4 CÁLCULOS

Para el cálculo del poder calorífico superior se utilizan las instrucciones del fabricante de la bomba.

Para los cálculos se utiliza la conversión:

El Poder Calorífico Inferior se calcula a partir del poder calorífico superior, deduciéndose 1,030 BTU por una libra (572 calorías por gramos) de agua proveniente de la humedad como la formada por combustión.

## **11 DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

### **11.1 EQUIPO**

Difractómetro de Rayos X, marca RIGAKU, modelo GEIGERFLEX D/MAX con goniómetro horizontal, tubo de cobre, velocidad de barrido 1.2 y 0.6° por segundo y con un barrido de 2° a 70°, voltaje de 40 Kv y de 15 mA.

### **11.2 CONSIDERACIONES**

Se debe elegir las condiciones particulares para la preparación adecuada de las muestras. Su preparación puede repercutir en los difractogramas:

- a) El mineral debe ser pulverizado hasta conseguir un finísimo polvo, casi impalpable con las yemas de los dedos.
- b) Se debe colocar adecuadamente el mineral pulverizado en la porta muestra del difractómetro.
- c) Tener cuidado con la eliminación máxima del efecto de orientación que el mineral pueda poseer por su propia estructura externa.

### **11.3 PROCEDIMIENTO**

El método empleado es el denominado Método del Polvo, consiste en:

- Se toma una muestra de carbón y se adhiere a una placa de vidrio, la cual va a rotar.
- Sobre dicha placa se hace incidir un haz de rayos X monocromático, que se va a difractar de acuerdo como incida con los diferentes planos cristalográficos.
- El registro de la intensidad y el ángulo de  $2\theta$  graficado, muestra difractogramas del compuesto, esto es comparado con varios difractogramas patrones pertenecientes a varios minerales. El difractograma es analizado y se obtiene los difractogramas que superpuestos lo componen. Así se identifican los minerales a los que pertenecen aquellos difractogramas componentes.

## **12 ANÁLISIS PETROGRÁFICO**

### **12.1 MATERIALES**

- Placas porta objetos.
- Placas cubre objetos.

### **12.2 REACTIVOS**

- Sílice Gel.
- Muestras de carbón mineral.

### **12.3 EQUIPOS**

- Máquina cortadora: 0.75 HP, 60 Hz y 1725 rpm.
- Microcortadora: 1 PH, 60 Hz y 100 rpm.

- Máquina desbastadora: 0.5 a 1 HP, 60 Hz y 1725 rpm.
- Máquina pulidora: 1 HP, 60 Hz, y 1500 rpm. Con regulador de flujo de agua.
- Base se los platillos pulidores de 9 cm. de radio y 1 cm. de espesor aprox.
- Platillos pulidores de 10.25 cm. de radio y de 1.4 mm. De espesor aproximadamente.

## **12.4 PROCEDIMIENTO**

### ***PREPARACIÓN DE LAS SECCIONES PETROGRÁFICAS PARA LA LUZ TRANSMITIDA (Lámina delgada)***

Las secciones petrográficas para la luz transmitida (secciones delgadas) son láminas muy delgadas especialmente de materiales no opacos, montado en porta objetos de vidrios, para exámenes de microscopio por luz transmitida.

Las etapas para la preparación de estas secciones, en orden son las siguientes:

- Corte.
- Desbaste.
- Impregnación.
- Nuevo corte.
- Esmerilado de acabado (pulido).

Prepara las muestras para realizar las láminas delgadas.

Tomar 1 a 3 gr. de la muestra de carbón mineral y colocarla sobre una placa porta objeto que contenga sílice gel, inmediatamente cubrir con la placa cubre objetos y dejar secar por 48 horas.

Analizar en el microscopio cada lámina del carbón mineral.

## **12.5 SUPERFICIE PULIDA**

### ***MÉTODO PARA PULIR PLUF (VITRINITA)***

- Carburo de Silicio con aceite: se utiliza con las pesas de 300 gr. durante 7 minutos, luego se procede a lavar el disco a una velocidad baja.
- Oxido de Aluminio con aceite: se utiliza con las pesas de 300 gr. por 5 minutos, luego se procede a lavar el disco a una velocidad baja.
- Disco de 7 micrones con pasta de 7 micrones y aceite con pesas medianas: Durante 5 minutos, no se lava el disco.
- Disco de 2.5 micrones más paste de 2.5 micrones con aceite y pesas medianas: durante 3 minutos, velocidad media y no se lava el disco.
- Disco de 1.25 micrones con polvo A, aceite y pesas pequeñas: Durante 3 minutos a velocidad máxima y no se lava el disco.
- Disco final “Supremeplate” con polvo B con aceite y las pesas pequeñas: Durante 3 minutos a velocidad máxima y no se lava el disco.

## **12.6 CALCULOS**

Los cálculos son más cualitativos que cuantitativos, ya que depende de la forma del cristal de los elementos que se presenten para definir su fase presente.



#### **Anexo 4. Tratamiento del carbón mineral con agua.**

Se utiliza para eliminar las arcillas y los sulfatos presentes en las muestras del carbón mineral.

##### **1 EQUIPOS**

- Lavacaros de 3 Lbs.
- Varilla agitadora.
- Medidor de pH.
- Guantes.
- Gafas.
- Fundas plásticas.
- Marcadores.
- Cintas adhesivas.

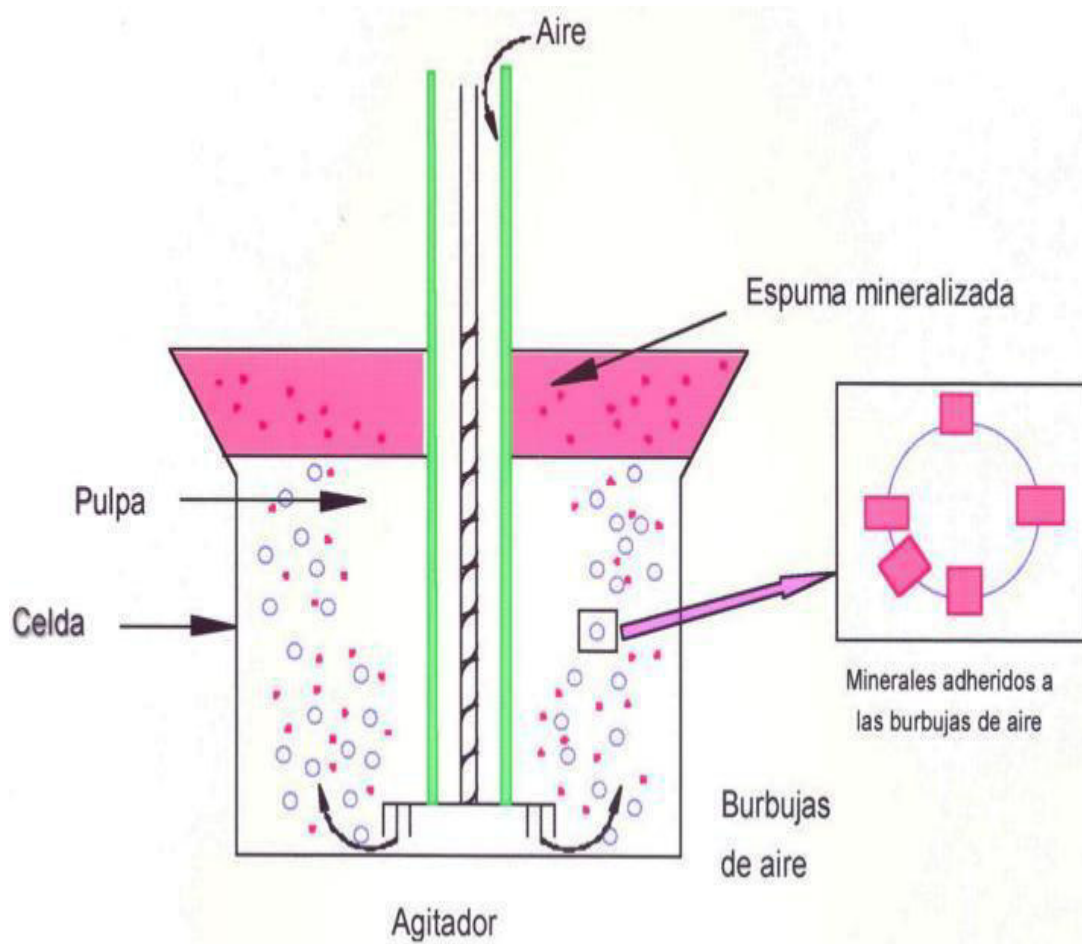
##### **2 REACTIVO**

- Agua.

##### **3 PROCEDIMIENTO**

- Pesar aproximadamente una libra de carbón.
- Verificar o preparar el agua a pH 7.
- Mezclar el carbón mineral con el agua en una lavacara y proceder a la agitación y fricción manual.
- Agitar durante 15 minutos aprox.
- Realizar la sedimentación durante 2 min.
- Eliminar todo el material fino, quedando solamente el material grueso.
- Secar la muestra a condiciones ambientales.
- Clasificar la muestra para los análisis de laboratorio.

**Anexo 5. Flotación en Celda tipo Denver.**



## **Anexo 6. Exposición de fotografías.**

**Foto 6.1: Muestras de carbón mineral.**



**Foto 6.2: Equipo cuarteador.**



*Foto 6.3:* **Carbón mineral cuarteado.**



*Foto 6.4:* **Chancadora de mandibula.**



*Foto 6.5: Muestras clasificadas.*



*Foto 6.6: Balanza de A. Vandoni.*



*Foto 6.7:* **Equipo microcortador.**



*Foto 6.8:* **Equipo de pulido.**



*Foto 6.9:* **Flotación del carbón mineral.**

